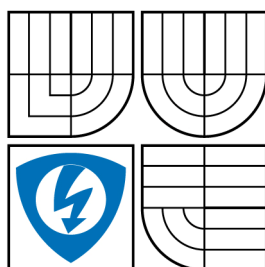


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**



**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS**

PRACOVISTĚ PRO MĚŘENÍ NÁHRADNÍHO SCHÉMATU FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ

WORKPLACE FOR MEASUREMENT OF SUBSTITUTE SCHEME OF PHOTOVOLTAIC CELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADEK KLEIN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ STEHLÍK

BRNO 2008

Abstrakt:

Předkládaná práce se zabývá problematikou solárních článků. Popisuje princip získávání elektrické energie z energie světelné, činnost samotných solárních článků, stanovuje náhradní linearizovaný model PN přechodu a nastiňuje možnosti měření tohoto modelu. Je doplněna ukázkou praktických měření a zpracováním a vyhodnocením naměřených výsledků.

Abstract:

The subject of this diploma thesis is to analyse solar cells, demonstrate linearized model of PN junction and show basic techniques of measurement of this model. Solar cells measurement and acquired result are also presented.

Klíčová slova:

Solární článek, fotovoltaika, paralelní odpor solárních článků, sériový odpor solárních článků, bariérová kapacita, difúzní kapacita.

Key words:

Solar cell, photovoltaic, parallel resistance of solar cells, serial resistance of solar cells, barrier capacity, diffusion capacity.

Bibliografická citace díla:

KLEIN, R. *Pracoviště pro měření náhradního schématu fotovoltaických článků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Stehlík.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 23. 5. 2008

.....

Poděkování:

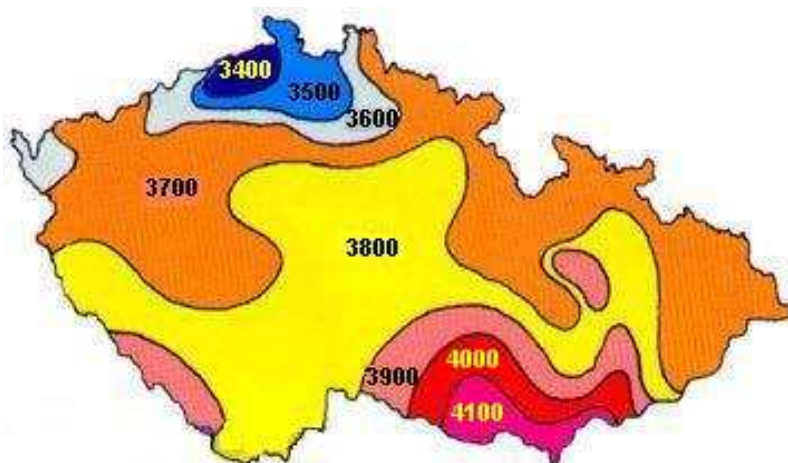
Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Stehlíkovi za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci. Dále děkuji Doc. Ing. Jaroslavu Bouškovi, CSc. za poskytnutou pomoc a odborné rady.

Obsah

Obsah	7
1 Úvod.....	8
2 Fotovoltaický princip	9
3 Materiály pro výrobu solárních článků	11
3.1 Křemík	11
3.2 Arsenid galia	12
3.3 Sirník kademnatý	12
4 Princip činnosti křemíkových článků	13
5 Náhradní schéma fotovoltaického článku	15
6 AV charakteristiky solárních článků.....	16
6.1 Sluneční spektrum AM 1.5 Global	16
6.2 Základní parametry solárních článků.....	17
6.3 Vliv paralelního a sériového odporu na kvalitu článku	20
6.4 Měření AV charakteristik solárních článků	23
7 Difúzní kapacita solárního článku	25
8 Bariérová kapacita solárního článku	27
8.1 Obecná definice bariérové kapacity solárního článku	27
8.2 Měření bariérové kapacity solárního článku.....	29
9 Měření náhradního modelu solárního článku	31
9.1 Návrh zařízení.....	31
9.2 Popis jednotlivých bloků obvodu	36
9.3 Program mikrokontroleru	37
9.4 Řídící aplikace měření	41
10 Praktické měření a vyhodnocení.....	43
10.1 Měření AV charakteristik	44
10.2 Měření bariérových kapacit	46
10.3 Shrnutí výsledků měření	48
11 Závěr	48
Použitá literatura	49
Příloha A : Program mikrokontroleru ATMEL ATmega8	51
Příloha B : Program ovládací aplikace	57

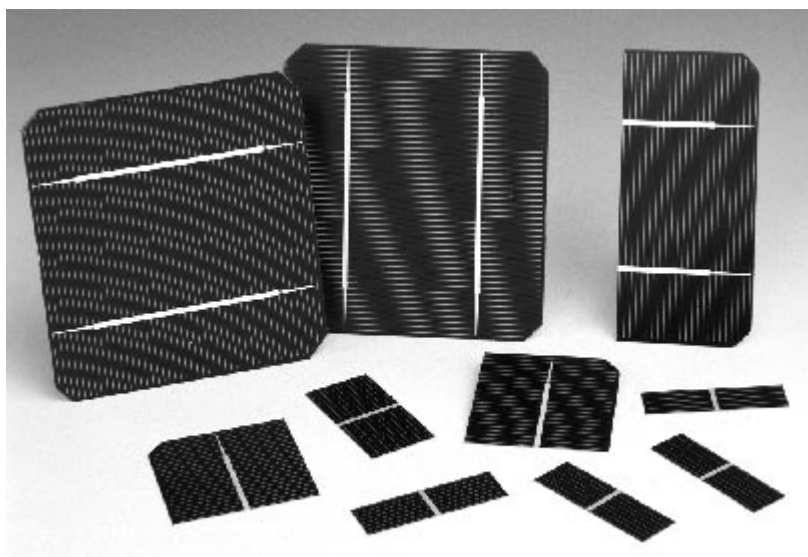
1 Úvod

Ročně dopadá na území České republiky cca 1500 hodin slunečního světla [1], což odpovídá zhruba 80 000 TWh energie. Roční spotřeba energie je u nás přitom zhruba 250x menší. Na obr. 1 je vyobrazeno rozložení slunečního záření na území naší republiky.



Obr. 1.: Globální sluneční záření na území ČR (MJ/m² za rok) (převzato z [1])

Jak je vidět, není všude intenzita záření stejná, vyšší je zejména v jižní části České republiky (růžová a červená barva), naopak nejmenší intenzita slunečního záření je naznačena tmavě modrou barvou (na obrázku oblast severních Čech).



Obr. 2.: Solární články (převzato z [1])

Výroba elektrické energie pomocí solárních článků (viz. obr. 2) by v budoucnu měla patřit k hlavním alternativním zdrojům energie. Tato energie je totiž přítomná

všude na celém povrchu a je velmi ekologická. Prozatímní nevýhodou je závislost výroby elektřiny na počasí a také malá účinnost solárních článků. I přes tyto nevýhody ale patří mezi nepřehlédnutelné zdroje energie pro náš budoucí život na planetě Zemi.

2 Fotovoltaický princip

Přeměna sluneční energie na energii elektrickou probíhá pomocí tzv. **fotovoltaického jevu** [2]. Ten objevil v roce 1839 francouzský vědec Alexandre Edmond Becquerel. Vědeckými pokusy bylo později vyzkoumáno, že základem fotovoltaické technologie je **fotoelektrický jev**. V současné době na principu fotovoltaického jevu pracuje řada součástek běžně užívaných v elektrotechnice.

Jakékoliv světelné záření (a tedy i sluneční světlo) se skládá z tzv. **fotonů**. Fotony jsou částice solární energie. Každý z nich má určitou vlnovou délku, která zároveň určuje, jak velikou energii daný foton obsahuje. Z toho vyplývá, že energie fotonů je závislá na vlnové délce spektra světelného záření.

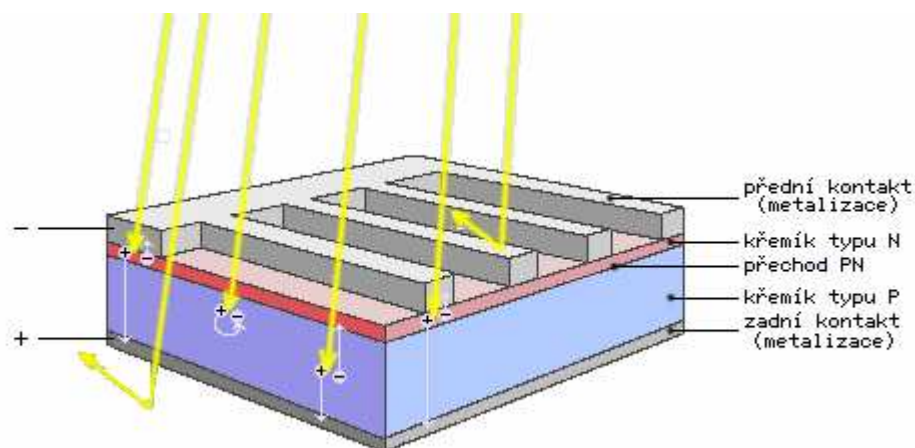
Pokud dopadne foton na fotovoltaický článek, mohou nastat tři případy reakce :

- dopadený foton se od solárního článku odrazí
- foton je článkem pohlcen
- foton projde skrze článek (v případě, že má dostatek energie)

Celou situaci dokumentuje obr. 3. V pravé části obrázku je vidět odrazení dopadajícího fotonu, střední pasáž obsahuje několik zcela pohlcených fotonů a v levé části obrázku je naznačen foton, který měl dostatek energie na to, aby prošel celým článkem skrz.

Z hlediska fotovoltaiky nás zajímají nejvíce fotony, které jsou článkem pohlceny. Pouze ty jsou totiž schopny produkovat elektrickou energii.

Pohlcený foton předá svou energii elektronu v atomu článku, který je vyroben z polovodičového materiálu (viz. kapitola 3 – Materiály pro výrobu solárních článků). Elektron, který takto získal energii z pohlceného fotonu, je schopen uvolnit se od jádra atomu a stává se částí elektrického obvodu. Po opuštění pozice zůstává po elektronu díra, která má kladný náboj – tím dojde ke generaci páru elektron-díra. Po generaci páru elektron-díra se na PN přechodu solárního článku vytvoří elektrické pole.



Obr. 3.: Tři případy reakce fotonů se solárním článkem (převzato z [2])

Dopadá-li i nadále na solární článek světelný paprsek, uvolní světlo další elektrony z křemíkové mřížky. Tyto volné elektrony a také vzniklé díry se elektrickým polem oddělí tak, že v jedné vrstvě křemíku vzniká přebytek elektronů a ve druhé jich je naopak nedostatek.

Pokud v tomto stavu dojde k propojení obou vrstev nějakým elektrickým spotřebičem, začne se nedostatek a přebytek elektronů ve vrstvách vyrovnávat – teče elektrický proud. Jeho velikost závisí na intenzitě ozáření solárního článku. K dispozici pro vedení elektrického proudu je vždy tolik volných elektronů, kolik jich bylo uvolněno energetickou výměnou díky dopadajícím fotonům.

3 Materiály pro výrobu solárních článků

V současnosti se solární články vyrábějí z několika různých druhů materiálů [3]. Ty nejvíce používané budou rozebrány v následujících kapitolách.

3.1 Křemík

Křemík je nejpoužívanějším materiálem pro výrobu solárních článků. Při výrobě se rozlišují dva druhy křemíku :

- polykrystalický křemík
- monokrystalický křemík

Polykrystalický křemík je vhodný pro solární články s menším výkonem. Jeho hlavní výhodou je dobrá účinnost i při nižších hladinách osvětlení.

Monokrystalický křemík (obr. 4) má oproti polykrystalickému křemíku větší výkonovou zatížitelnost a hodí se tudíž pro větší výkony. Solární články z monokrystalického křemíku mají také při dostatečném osvětlení vyšší účinnost než články vyrobené z křemíku polykrystalického.



Obr. 4.: Monokrystal křemíku (převzato z [3])

Obvyklou metodou pro výrobu monokrystalického křemíku je řízená krystalizace z taveniny, nazývaná Czochralského proces [4]. Při tomto postupu je do křemíkové taveniny vložen zárodečný krystal vysoce čistého křemíku. Tento krystal se pomalu otáčí a pulzuje podle předem definovaného programu, přičemž teplota taveniny je také

pečlivě sledována a řízena. Celý proces probíhá v nádobách velmi čistého křemíku v inertní atmosféře argonu.

Na zárodečném krystalu se pak vylučují další vrstvy mimořádně čistého křemíku, výsledný produkt (křemíkový ingot) pak může mít až 400 mm v průměru a délku 2 m, tvořen je přitom jediným krystalem.

Vyrobený ingot se po ochlazení řeže na tenké vrstvy (typicky 0,5 mm), leští a je použit jako výchozí surovina pro výrobu polovodičových součástek – a tedy i solárních článků.

Současné technologie umožňují vyrábět křemíkové solární články, které mají účinnost přeměny solární energie na energii elektrickou v rozmezí 4–13 %. Malá účinnost je tedy v současnosti jedním z hlavních problémů fotovoltaiky. Z tohoto důvodu se začaly používat a zkoušet jiné druhy materiálů s vyšší účinností.

3.2 Arsenid galia

Solární články vyrobené z arsenidu galia (GaAs) dosahují vyšší účinnosti než články vyrobené z křemíku (dokonce až 20 %), navíc jsou odolnější proti kosmickému záření a mohou pracovat bezproblémově i při teplotách nad 100 °C.

Podstatnou nevýhodou fotovoltaických článků vyrobených z arsenidu galia je jejich vysoká cena a také potřeba větší hustoty GaAs při jejich výrobě, než je tomu u křemíkových článků.

Trendem současného vývoje je kombinace obou článků (GaAs a křemíkových). Kombinace obou materiálů by totiž měla vést k vyšší účinnosti a to zejména z toho důvodu, že oba materiály mají rozdílnou spektrální citlivost. Vhodnou kombinací obou typů článků, případně použitím germania (Ge) místo křemíku (Si) lze dosáhnout účinnosti až 30%. Ve spojení s koncentrátory se v budoucnu očekává ještě vyšší účinnost, až ke 40%.

3.3 Sirník kademnatý

Články tvořené přechodem Cu_2S a CdS (sirník kademnatý) dosahují účinnosti kolem 10% a jejich velkou výhodou je jejich malá hmotnost. Toho se využívalo především při uplatnění takovýchto článků u kosmických aplikacích.

Nevýhodou těchto solárních článků je poměrně malá stabilita, což nakonec vedlo k tomu, že v současnosti se tyto články již téměř nepoužívají.

Obdobou článků vyrobených z CdS jsou články vyrobené kombinací sirníku kademnatého a teluridu kademnatého (systém $\text{CdS} - \text{CdTe}$). Tyto články však

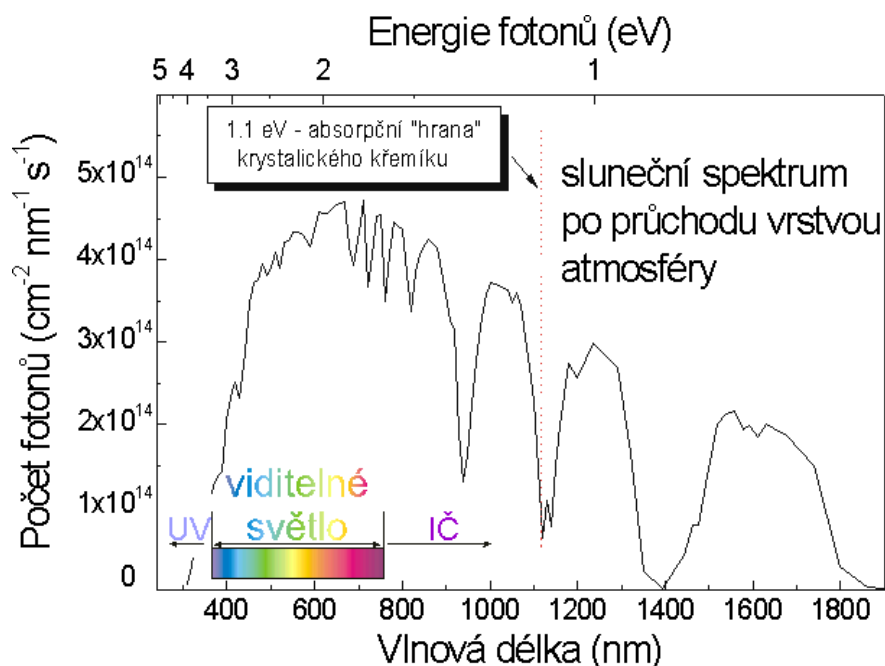
vyhovují jen pro napájení zařízení s malým příkonem a v energetice nemají praktické využití.

4 Princip činnosti křemíkových článků

Křemík má stejnou krystalovou strukturu jako diamant. Na rozdíl od něj však není průhledný a absorbuje světlo s kratšími vlnovými délkami než je $1\mu\text{m}$ (což odpovídá fotonům s energií větší než $1,1\text{ eV}$). Ve spektru tato vlnová délka odpovídá části infračerveného světla, dále pak celé oblasti viditelného světla a také ultrafialovému záření. Křemík je tedy schopen absorbovat podstatnou část světelného spektra. Tuto skutečnost dokumentuje obr. 5, na kterém je znázorněno spektrum slunečního světla po průchodu atmosférou pod úhlem 48° od normály (takovému spektru se potom říká tzv. **spektrum AM 1,5**). Současně je možno vidět také absorpční hranu krystalického křemíku na úrovni $1,1\text{ eV}$.

Dopadne-li na křemík foton o energii menší než $1,1\text{ eV}$, není článkem absorbován a křemíkem projde. Hodnota energie $1,1\text{ eV}$ odpovídá šířce zakázaného pásu, každý elektron, který se má podílet na vedení proudu v polovodiči musí mít tedy energii větší, aby byl schopen zakázaný pás překonat.

Pokud tedy dopadnou na článek fotony s energií větší než $1,1\text{ eV}$, dojde k jejich absorpci a v polovodiči vznikne jeden volný elektron a jedna volná díra (viz. kapitola 2 – Fotovoltaický princip).



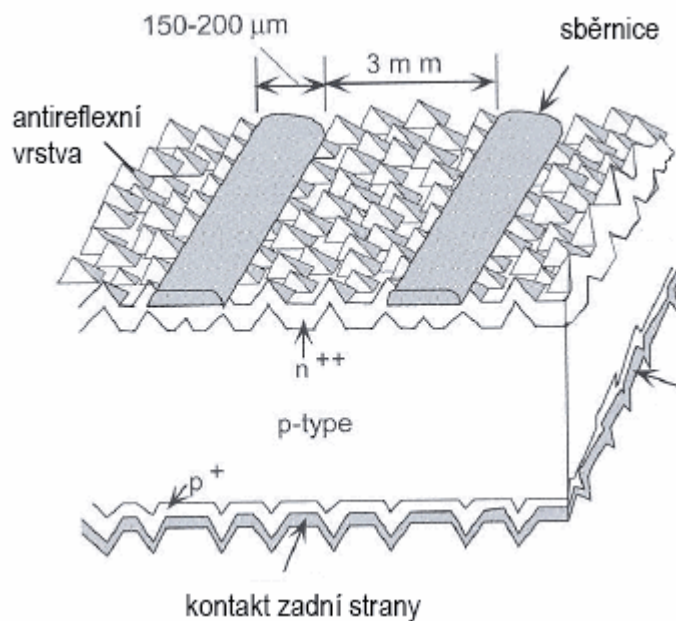
Obr.5.: Spektrum světelného záření (převzato z [6])

Aby sloužil článek jako zdroj proudu, musí v něm nastat rozdělení volných elektronů a děr. Solární článek není homogenní polovodič, to znamená že není složen z materiálu jednoho druhu vodivosti. Článek se naopak skládá z části mající elektronovou vodivost (materiál typu n) a z části mající vodivost děrovou (materiál typu p).

Po osvětlení PN přechodu článku na něm dojde k oddělení děr a elektronů a na kontaktech se tak objeví napětí naprázdno – U_{oc} .

Proud začne článkem procházet po připojení spotřebiče ke kontaktům článku. Jeho velikost je úměrná počtu absorbovaných fotonů a tedy i ploše daného článku.

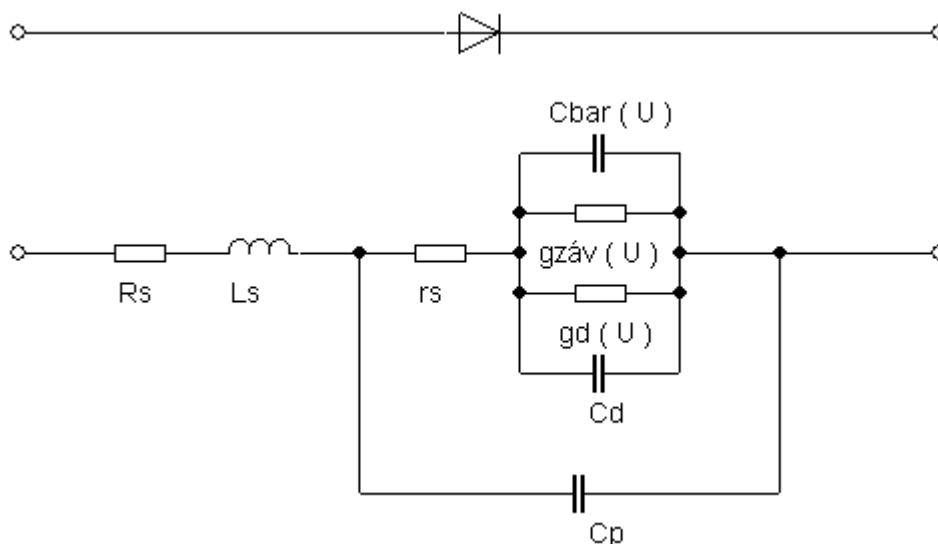
Každý fotovoltaický článek je tedy ve skutečnosti polovodičová dioda s PN přechodem o velké ploše. Kromě zmiňovaného PN přechodu článek obsahuje celoplošný kovový kontakt (tzv. reflektor) a vrchní kovový kontakt, nazývaný mřížka (hřeben), který zabírá velmi malou plochu, aby nestínil PN přechod a nesnižoval tak účinnost článku. Idealizovanou strukturu solárního článku zobrazuje obr. 6.:



Obr. 6.: Struktura solárních článků z krystalického křemíku (převzato z [3])

5 Náhradní schéma fotovoltaického článku

Každý PN přechod (a tedy i solární článek) lze nahradit v případě malých změn signálu linearizovaným modelem [5], viz. obr. 7.:



Obr. 7.: Náhradní linearizovaný model pn přechodu

Jak je z obrázku patrné, je možno každý PN přechod rozložit na řadu komponent, které ovlivňují jeho vlastnosti. Tyto parazitní vlastnosti jsou velmi důležitými prvky při hodnocení kvality PN přechodu (a tím také i solárního článku).

V obr.7 označuje C_{bar} tzv. bariérovou kapacitu přechodu, která je významná v závěrném směru, další veličinou určující se v závěrném směru je g_{zav} , která představuje velmi malou **vodivost** PN přechodu při přiložení závěrně polarizovaného napětí.

Veličina C_d značí difúzní kapacitu, která má původ v difúzi nosičů náboje přes otevřený PN přechod, projevuje se tedy při vodivém stavu přechodu a vyjadřuje velikost náboje nahromaděného v přechodu a jeho blízkém okolí a její změnu s protékajícím proudem. Vodivost v propustném směru určuje symbol g_d .

Jak je patrné ze zapojení náhradního linearizovaného modelu, všechny předchozí čtyři veličiny jsou závislé na přiloženém napětí. Zbývající prvky pak již na velikosti přiloženého potenciálu nezávisí.

Symbolem r_s je označován první z nich a to sériový odpor PN přechodu, který je tvořený polovodičovým materiálem mimo oblast samotného přechodu. Rezistor R_s modeluje odpor přívodů a kontaktů přechodu PN, jejich indukčnost označujeme L_s . Velikost indukčnosti přívodů hraje velmi významnou roli při práci v oblasti vysokých kmitočtů.

Posledním použitým symbolem v náhradním linearizovaném modelu pn přechodu z obr. 7 je parazitní kapacita pouzdra a přívodů, označená jako C_p .

6 AV charakteristiky solárních článků

Každý vyrobený solární článek prochází podrobnými měřeními. Elektrické parametry se měří při intenzitě osvětlení 1000 W/m^2 , při spektrálním složení světla odpovídajícímu slunečnímu spektru (tzv. **AM 1.5 Global**) a při teplotě 25° [6].

6.1 Sluneční spektrum AM 1.5 Global

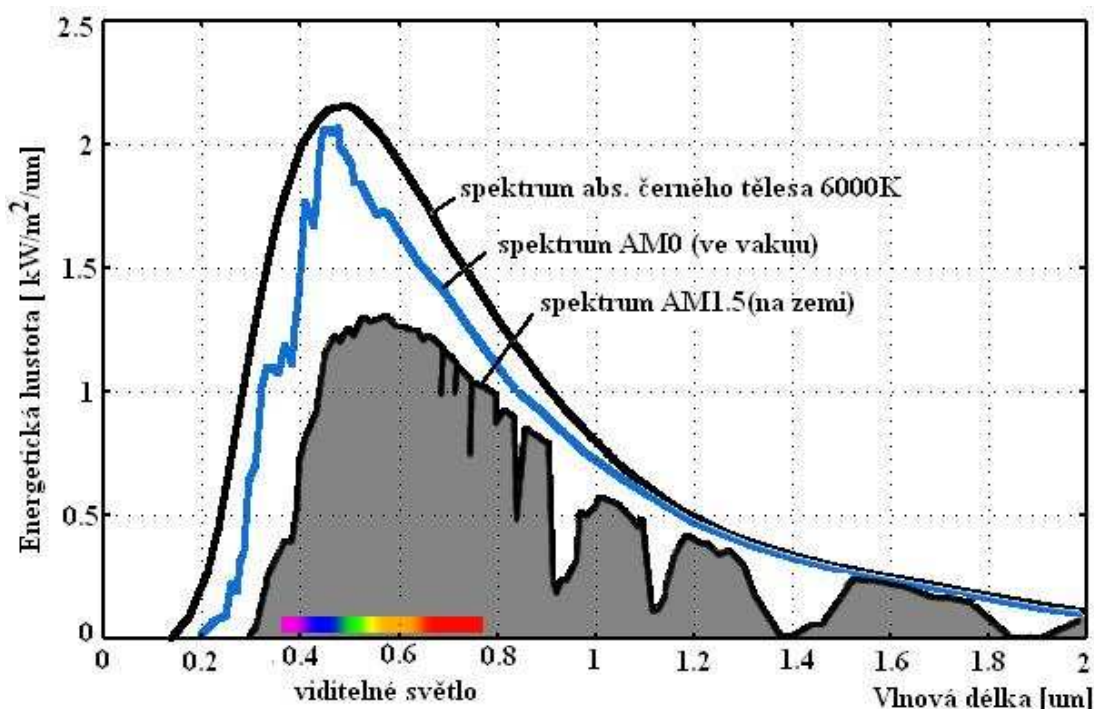
Energie ve Slunci vzniká slučováním vodíkových jader v helium při teplotě okolo 15 milionů stupňů. Na pozorovatelném povrchu Slunce už je teplota jen kolem 6000 K.

Zářivý výkon celého Slunce je $3,85 \times 10^{23} \text{ kW}$. Většina tohoto výkonu se vyzáří do prostoru a k Zemi dorazí jen asi 10^{-9} z maximálního výkonu. Avšak i tento výkon ($1,744 \times 10^{14} \text{ kW}$ na celou ozářenou polokouli) je velmi úctyhodné číslo, vzhledem k tomu, že pro lidské potřeby postačí využít jen malý zlomek této energie.

Země obíhá kolem Slunce ve vzdálenosti 150 milionů kilometrů. Energetická hustota slunečního záření v této vzdálenosti je ve vakuu $1367 \pm 7 \text{ W/m}^2$. Tato energie je rozložena do elektromagnetického spektra přibližně odpovídajícího záření absolutně černého tělesa o teplotě 5700 K.

Při průchodu atmosférou se část sluneční energie ztratí – asi 300 W/m^2 se v atmosféře absorbuje a kolem 100 W/m^2 se rozptýlí. Část rozptýlené energie přispívá k celkovému osvětlení jako difúzní záření oblohy (nebeská modř).

K Zemi tak dorazí spektrum odpovídající rozložení nazývanému **AM1.5**. Na obr. 8 je vysvětlen princip vzniku tohoto spektra slunečního záření.



Obr. 8.: Princip odvození spektrálního rozložení AM 1.5 Global (převzato ze [7])

Z obr. 8 vyplývá, že spektrum, které dorazí až na povrch Země je odvozeno ze slunečního spektra, které ztratilo při cestě na Zemi část energie.

AM0 (tzv. air mass) je spektrum slunečního záření v kosmickém prostoru ve vzdálenosti 150 milionů kilometrů od slunce bez ovlivnění atmosférou.

Podle přesné definice [7] je pak **AM1.5** modelové spektrum slunečního záření po průchodu bezoblačnou atmosférou. Energetická hustota tohoto spektra je 1 kW/m^2 , v reálu ale silně závisí na průhlednosti atmosféry. Celkový teoretický využitelný výkon slunečního záření odpovídá ploše pod křivkou AM1.5.

Pokud je slunce přímo v zenitu, ve výšce devadesáti stupňů, prochází sluneční záření nejmenší vrstvou vzduchu. Takové spektrum se označuje jako AM1. Většinu doby ale slunce nebývá tak vysoko a sluneční záření proto musí procházet větší či menší vrstvou atmosféry. Pro fotovoltaiku se proto používá spektrum AM1.5, odpovídající výšce slunce přibližně 45° nad obzorem. Sluneční záření v tomto případě prochází jeden a půl násobně mohutnější vrstvou vzduchu.

6.2 Základní parametry solárních článků

Základním parametrem solárních článků je proud označovaný jako I_{450} . Jedná se o hodnotu proudu, který solárním článkem protéká pokud na jeho kontaktech naměříme

napětí 450mV. Podle proudu I_{450} se jednotlivé solární články rozdělují do základních skupin.

Dalšími parametry jsou proud I_{SC} a napětí U_{OC} . Proud I_{SC} se nazývá **zkratový proud** a je to, při kterém klesne napětí na solárním článku na 0V. Tento proud lze však měřit pouze za použití speciálního měřicího přístroje, aby nedošlo k porušení měřicího přístroje či samotného solárního článku.

Naproti zkratovému proudu stojí parametr U_{OC} , **napětí naprázdno**, nebo-li napětí na kontaktech solárního článku pro případ, že není zapojen žádný elektrický spotřebič a tudíž z článku není odebírán žádný proud.

Jedním z velmi důležitých parametrů je také **maximální možný výkon**, který je možné ze solárního článku odebírat. Označuje se jako P_m . Z hlediska optimálního využití slunečního záření je ve všech aplikacích, které používají fotovoltaické články, doporučováno, aby se pracovní podmínky daného obvodu pohybovaly právě kolem tohoto bodu, tedy kolem maximálního výkonu článku.

S maximálním výkonem jsou spojeny další dva parametry solárních článků – I_m a U_m – označující proud, resp. napětí, které je možné na solárním článku naměřit v okamžiku jeho maximálního zatížení.

Pokud použijeme předchozí objasněné parametry solárního článku, je možné získat hodnotící parametr, který se nazývá **fill-factor** (FF), a který se určuje podle vztahu (1) :

$$FF = \frac{U_m * I_m}{U_{OC} * I_{SC}} \quad (1)$$

Z uvedeno vztahu vyplývá, že fill-factor, nebo-li faktor naplnění, je vlastně poměrové číslo maximálního výkonu ku proudu nakrátko vynásobenému napětím naprázdno a ukazuje jak moc efektivní je měřený článek.

S fill-factorem souvisí také **účinnost** solárního článku, která se značí EEF a určuje jak moc je solární článek účinný v poměru dopadajícího světla ku přeměněné elektrické energii.

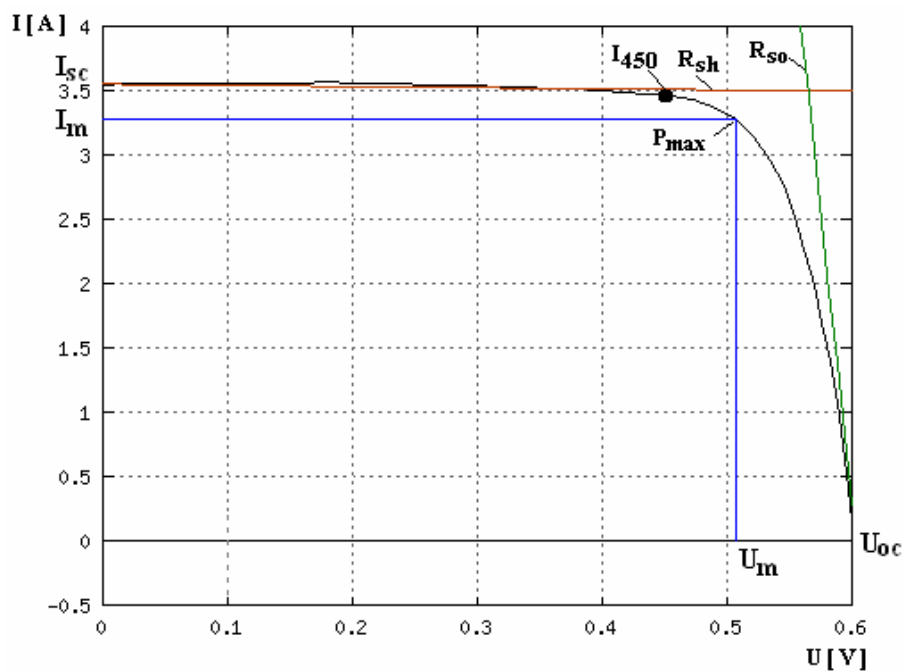
Poslední dva parametry důležité pro charakteristiku solárních článků jsou **sériový odpor článku** (R_{so}) a **paralelní odpor solárního článku** (R_{sh}). Jejich vliv na solární články bude ukázán v následující kapitole.

Celkový přehled charakteristických vlastností solárních článků ukazuje tab. 1.:

Tab. 1.: Přehled základních charakteristik solárních článků

Parametr	Popis
I_{450}	Proud tekoucí článkem při napětí 450 mV
I_{sc}	Zkratový proud tekoucí článkem při napětí 0 V
U_{oc}	Napětí na solárním článku naprázdno (bez zátěže)
P_m	Maximální výkon, který může článek dodávat
I_m	Proud při kterém článek dodává maximální výkon
U_m	Napětí, při kterém článek dodává maximální výkon
FF	Fill-factor – faktor naplnění, viz. vzorec pro výpočet (1)
EEF	Účinnost solárního článku
R_{so}	Sériový odpor solárního článku
R_{sh}	Paralelní odpor solárního článku

Kromě tab. 1 shrnuje parametry solárních článků také jejich ampér-voltová charakteristika, což je v podstatě zatěžovací křivka daného solárního článku. Její příklad ukazuje obr. 9.:



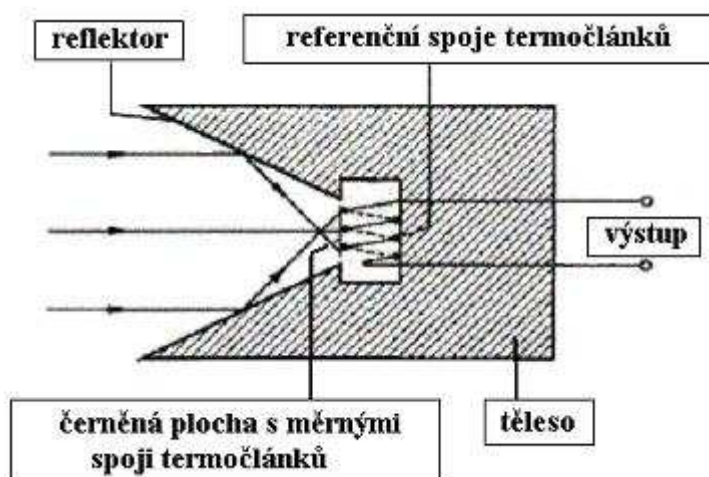
Obr. 9.: AV charakteristika solárního článku (převzato z [6])

Z obr. 9 je patrné rozložení všech dříve uvedených parametrů solárních článků. Pokud tedy má uživatel k dispozici AV charakteristiku používaných solárních článků, může z ní určit téměř všechny důležité parametry.

Jak již bylo několikrát uvedeno, provádí se měření základních parametrů solárních článků při intenzitě osvětlení 1000 W/m^2 , při spektrálním složení světla odpovídajícímu slunečnímu spektru (AM1.5 Global) a při teplotě 25°C . Samotnou intenzitu osvětlení můžeme měřit např. za pomoci tzv. **termoelektrické baterie** [8]. Tento přístroj slouží jako senzor záření v široké oblasti vlnových délek od 150 nm do $15 \text{ }\mu\text{m}$.

Na obr. 10 je vyobrazen podélný řez termoelektrickou baterií. Černěná plocha obsahuje spoje termočlánků spojených do série, které jsou zabudovány do masivního kovového tělesa. Kuželový reflektor zajišťuje dopad svazku záření na plochu s termočládky.

Termoelektrická baterie je mimořádně citlivý detektor záření v široké oblasti vlnových délek. Proto pokud chceme měřit intenzitu záření pouze ve viditelné části spektra, je nutno opatřit vstupní otvor ochranným skleněným okénkem, které potlačí infračervené tepelné vyzařování zdroje záření.

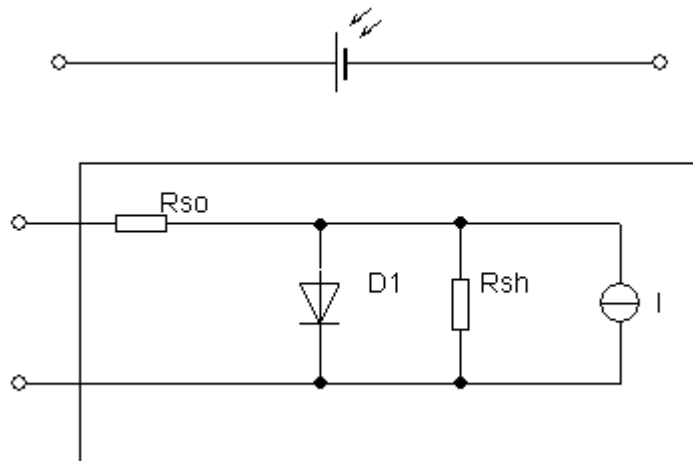


Obr. 10.: Podélný řez termoelektrickou baterií pro měření intenzity osvětlení (převzato z [7])

6.3 Vliv paralelního a sériového odporu na kvalitu článku

Vliv sériového a paralelního odporu na AV charakteristiku solárních článků je možné zpozorovat na obr. 9. Obě dvě hodnoty určují sklon AV charakteristiky. Z daného obrázku je zcela patrné, že paralelní odpor R_{sh} je tečnou na zkratový proud I_{SC} , zatímco odpor sériový – R_{so} – je tečnou na napětí naprázdno U_{OC} .

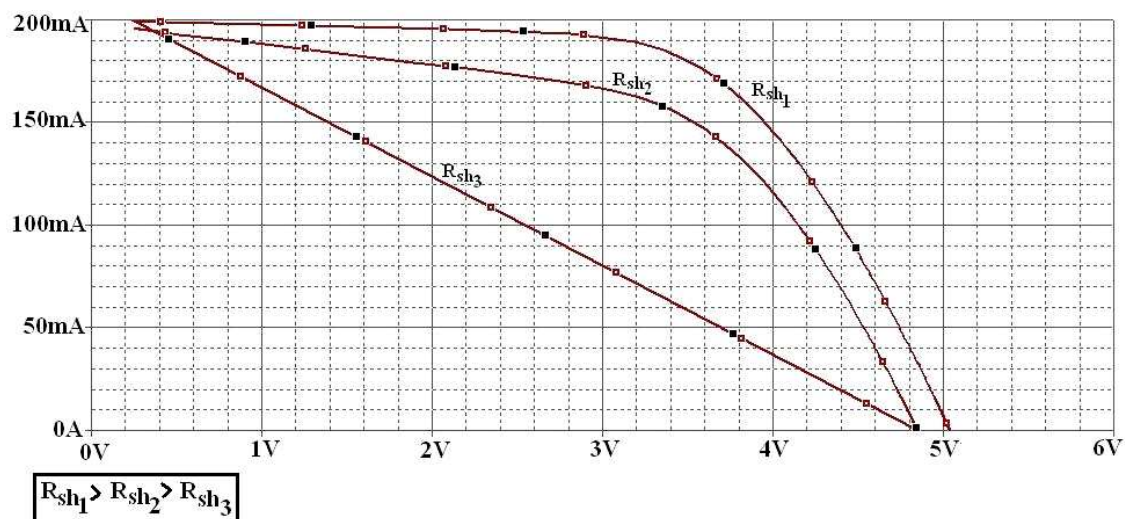
Pro důkaz vlivu paralelního a sériového odporu článku na jeho charakteristiku byl použit simulační program SPICE, ve kterém se vytvořil model solárního článku (viz. obr. 11) a simulovalo se jeho zatěžování. Proudový zdroj v modelu dodával hodnotu 200 mA. Napětí U_{OC} simulovalo celkem 5 diod zapojených v sérii.



Obr. 11.: Model solárního článku pro simulace v programu OrCAD PSpice

Náhradní model solárního článku se skládá z PN přechodu reprezentovaného zde diodou, která zároveň určuje napětí naprázdno daného modelu solárního článku. Dále model obsahuje paralelní odpor R_{sh} a sériový odpor R_{so} . Důležitou součástí modelu je ideální zdroj proudu I , který určuje hodnotu zkratového proudu I_{SC} . Pokud za sebe do série bude zařazeno několik diod, bude dosaženo většího napětí naprázdno U_{OC} .

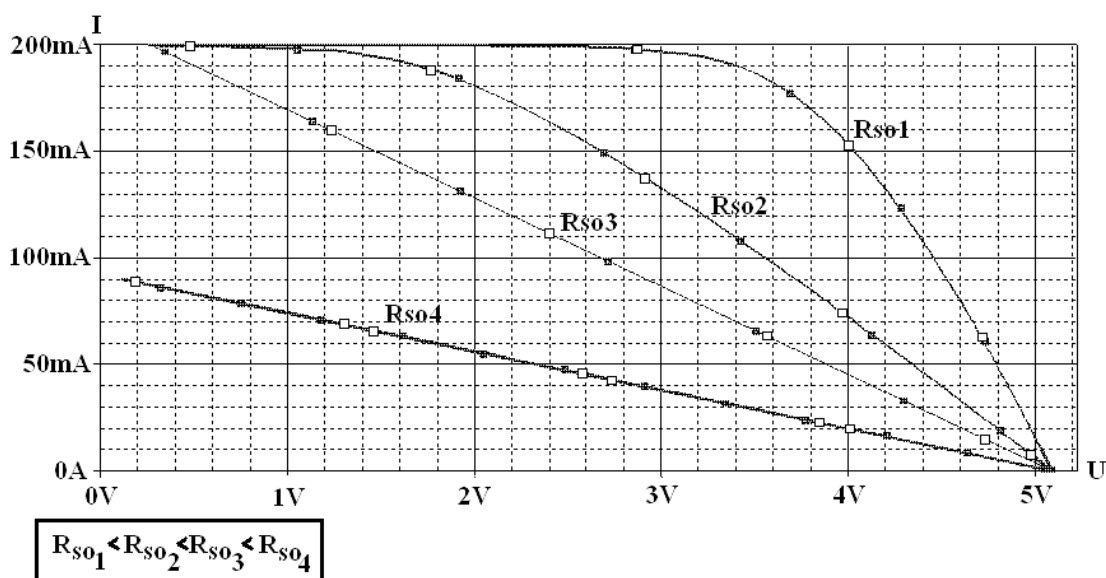
Dříve uvedená AV charakteristika solárního článku (obr. 9) je charakteristikou článku, který má hodnoty sériového a paralelního odporu v pořádku a článek nevykazuje jejich negativní vliv na tvar AV charakteristiky. Pokud však bude použit v simulacích model článku z obr. 11, kdy je nastavena hodnota sériového odporu na konstantní je možné sledovat vliv změny paralelního odporu na tvar křivek. Tento případ dokumentuje obr. 12, kdy byly nastavovány 3 různé hodnoty paralelního odporu.



Obr. 12.: Vliv paralelního odporu na charakteristiky solárního článku

Ze simulace zcela jasně vyplývá, že pokud bude mít článek hodnotu paralelního odporu nízkou (R_{sh3}), bude se chovat jako by byl uvnitř zkratovaný a solární článek se stane měkkým zdrojem, který bude mít velký pokles napětí v závislosti na zatížení spotřebičem. Příliš nízké hodnoty paralelního odporu tedy znehodnocují kvalitu solárních článků.

Obdobná simulace byla provedena i pro vliv sériového odporu, tentokrát byl nastavena na pevnou hodnotu R_{sh} a rozmítanou veličinou byl právě sériový odpor R_{so} . Výsledky simulací ukazuje obr. 13.



Obr. 13.: Vliv sériového odporu na charakteristiky solárního článku

Ze závislosti na obr. 13 opět jasně vyplývá, že hodnota sériového odporu ovlivňuje maximální možný výkon solárního článku, v podstatě podle její velikosti se posouvá zlom v charakteristice. Pokud je sériový odpor příliš velký, dojde k linearizaci závislosti a nastane stejná situace jako u solárního článku, který má příliš nízký paralelní odpor. Opět se v tomto případě ze solárního článku stane měkký zdroj silně závislý na velikosti odebíraného proudu.

6.4 Měření AV charakteristik solárních článků

Ze závislostí na obr. 12 a 13 zcela jasně vyplývá, že pro zhodnocení kvality solárního článku jsou paralelní (R_{sh}) a sériový (R_{so}) odpor velmi důležité a je tedy zapotřebí sledovat jejich hodnoty.

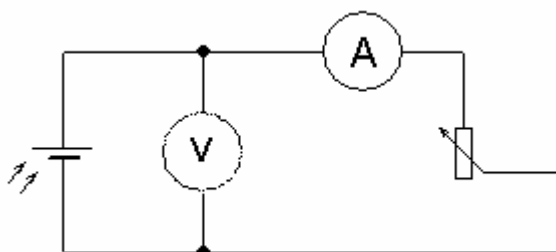
V předchozím textu byl také objasněn vztah těchto dvou veličin k ostatním charakteristikám solárních článků. Paralelní odpor je tečnou k AV charakteristice v hodnotě zkratového proudu I_{SC} , zatímco sériový odpor je tečnou k charakteristice v hodnotě napětí naprázdno (U_{OC}). Z těchto faktů tedy vyplývá následující myšlenka. Pokud je známá AV charakteristika solárního článku, je z ní možno odvodit jeho paralelní a sériový odpor.

Hodnota napětí naprázdno (U_{OC}) je určena přiložením voltmetru na osvětlený solární článek, který není zatížený (je tedy bez zátěže a není z něj odebírán žádný proud).

Zkratový proud I_{SC} se určí také velmi snadno a to tak, že se změří proud tekoucí článkem při zkratování jeho výstupních vývodů. Jak již bylo uvedeno dříve, je však zapotřebí toto měření provádět za pomoci speciálního ampérmetru.

Napětí naprázdno i proud na krátko jsou parametry závislé na teplotě a proto se měření provádí tak, že mezi samotným článkem a zdrojem osvětlení je dodržena minimální vzdálenost 50 cm, aby nedošlo k ohřátí článku sáláním ze zdroje světla.

Principiální zapojení pro měření AV charakteristik solárního článku je na obr. 14.



Obr. 14.: Principiální zapojení pro měření AV charakteristik

Základní měření AV charakteristiky solárního článku vychází z postupného zatěžování měřeného článku. Změnou odporu zátěže se totiž mění proud procházející obvodem a díky tomu klesá napětí na měřeném článku. Z naměřených hodnot je pak sestavena požadovaná AV charakteristika a odečten maximální možný výkon článku P_m .

Výkon v jednotlivých místech charakteristiky je potom vždy určen podle vztahu (2):

$$P = UI \quad (2)$$

Pokud bude znám průběh AV charakteristiky, je možné z něj podle (3) následovně určit hodnotu paralelního odporu (jako tečnu zkratového proudu I_{SC}) :

$$R_{sh} = \frac{U_1 - U_{SC}}{I_{SC} - I_1} \quad (3)$$

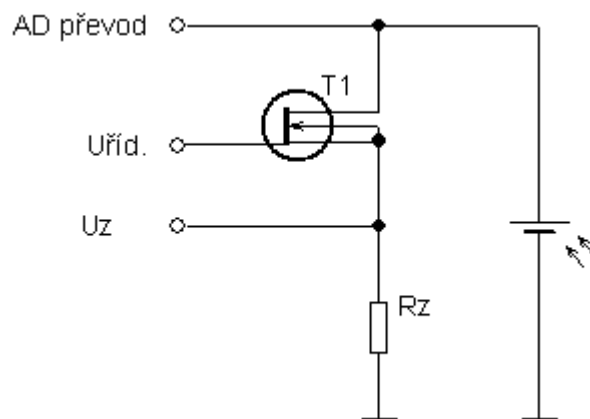
V tomto vztahu I_{SC} je rovno zkratovému proudu článku při napětí U_{SC} , které by mělo být teoreticky nulové a U_1 je napětí na lineární části AV charakteristiky při průchodu proudem I_1 .

Stejným způsobem se podle vztahu (4) určí také sériový odpor měřeného solárního článku – nebo-li tečna na AV charakteristiku při napětí naprázdno U_{OC} :

$$R_{so} = \frac{U_{OC} - U_2}{I_2 - I_{OC}} \quad (4)$$

V tomto vztahu odpovídá U_{OC} napětí naprázdno, při kterém by teoreticky měl téci obvodem nulový proud I_{OC} a U_2 je částečně snížené napětí oproti U_{OC} , při kterém teče článkem proud I_2 .

Realizace principiálního obvodu pro měření AV charakteristik je velmi jednoduchá a její příklad ukazuje obr. 15.:



Obr. 15.: Konkrétní zapojení pro měření AV charakteristik solárních článků

V uvedeném zapojení plní funkci nejdůležitějšího prvku tranzistor T1, NMOS tranzistor, který je řízen napětím $U_{říd.}$. Podle velikosti řídicího napětí je tranzistor otevřen a odebírá do zatěžovacího rezistoru R_z proud. Podle velikosti proudu je pak také odečítáno napětí na solárním článku. Nastavením různých hodnot velikostí řídicího napětí může být proměřena celá AV charakteristika solárního článku. Pokud bude řídicí napětí malé, bude solární článek téměř nezatížený a bude na něm hodnota napětí blížíící se napětí naprázdno U_{OC} . Naopak ve druhém případě, když bude tranzistor řídicím napětím otevřen naplno, poteče jím maximální proud, který v daném obvodu může téct. V případě, že se zatěžovací rezistor R_z bude blížit nulové hodnotě, bude i proud tekoucí obvodem blízko hodnotě I_{SC} . Proud tekoucí obvodem je snímán jako napětí U_z na rezistoru R_z .

Kompletní návrh měřícího zařízení pro měření parametrů solárních článků bude probíráán v jedné z následujících kapitol.

7 Difúzní kapacita solárního článku

Pokud je na pn přechodu přiloženo stejnosměrné napětí v propustném směru, kterým se nastaví vhodný pracovní bod a na kterém je nesuperponovaný malý střídavý signál, je celkové napětí na pn přechodu rovno :

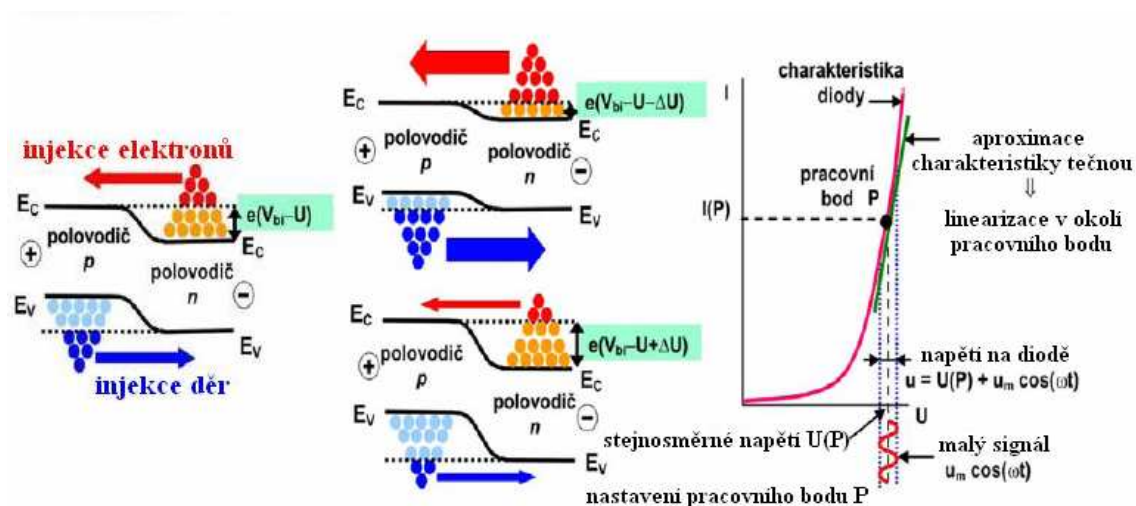
$$u(t) = U + u_m \exp(i\omega t) \quad (5)$$

V uvedeném vztahu (5) zastupuje U stejnosměrnou složku přiloženého napětí, druhá část vztahu potom představuje střídavou složku o amplitudě u_m . Platí přitom, že $u_m \ll U$.

Malá střídavá složka způsobí, že napětí na pn přechodu kolísá v malém intervalu:

$$U - u_m \leq u \leq U + u_m \quad (6)$$

Hodnota napětí na pn přechodu tedy podle (6) kolísá kolem střední hodnoty U a to vede k tomu, že se snižuje nebo zvyšuje výška potenciálové bariéry PN přechodu (viz. obr.16).



Obr. 16.: Vliv nesuperponovaného střídavého signálu na výšku potenciálové bariéry (převzato z [5])

V důsledku změny výšky potenciálové bariéry se snižuje nebo zvyšuje počet elektronů vstříkovaných oblasti n do p a počet děr vstříkovaných z oblasti p do n . Z tohoto důvodu tedy také kolísá i proud procházející PN přechodem.

Malá změna napětí na PN přechodu tedy vede k tomu, že se změní celkový elektrický náboj vstříkovaný z jedné oblasti PN přechodu do druhé. Změna náboje vyvolaná změnou napětí je podle obecné definice kapacita, v tomto případě, jelikož se jedná převážně o difúzní charakter proudu PN přechodem, je kapacita nazývána **difúzní** [5].

Difúzní kapacita je silně závislá na době života nosičů τ a velikosti stejnosměrného proudu.

Její hodnota lze velmi jednoduše stanovit. Jestliže totiž každý elektron nebo díra setrvá ve struktuře po dobu τ a prochází-li přechodem proud I , pak celý přenášený elektrický náboj je :

$$Q = I\tau \quad (7)$$

Po dosazení do vztahu (7) z rovnice voltampérové charakteristiky diody a užitím obecného vztahu pro kapacitu dostaneme :

$$Q = I\tau = I_s \exp\left(\frac{U}{U_T}\right)\tau \Rightarrow C_d = \left|\frac{dQ}{dU}\right| = \frac{1}{U_T} I_s \exp\left(\frac{U}{U_T}\right)\tau = \frac{I\tau}{U_T}, \quad (8)$$

kde U_T značí teplotní napětí (pro teplotu 300 K je jeho hodnota cca 26 mV), I_s je saturační proud daného pn přechodu, který je určen rozměry a vlastnostmi přechodu a τ je již zmiňovaná doba života nosičů.

8 Bariérová kapacita solárního článku

8.1 Obecná definice bariérové kapacity solárního článku

Druhou kapacitní vlastností pn přechodů a tím i solárních článků je tzv. **bariérová kapacita** [9]. Bariérová kapacita pn přechodu je velmi výrazná v závěrném směru a může velmi ovlivnit dynamické vlastnosti přechodu a tím i celého solárního článku.

Bariérová kapacita pn přechodu je závislá na přiloženém napětí v závěrném směru. Tato závislost bývá znázorňována jako tzv. CU-charakteristika (nebo CV-charakteristiky, podle anglického termínu voltage – napětí).

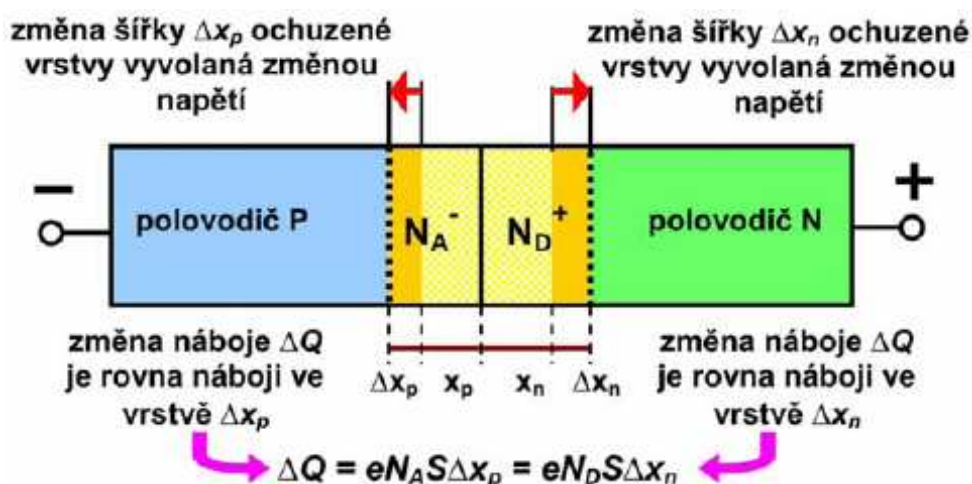
Při přiložení závěrného napětí na pn přechod se rozšiřuje jeho ochuzená vrstva a její šířka závisí na velikosti přiloženého napětí.

Ochuzená vrstva v závěrném směru neobsahuje téměř žádné volné nosiče náboje (závěrný proud pn přechodu je velmi malý), takže se ochuzená vrstva chová jako dielektrikum. Z jedné strany k ochuzené oblasti přiléhá oblast polovodiče typu p s volnými děrami s kladným nábojem, ze strany druhé pak oblast polovodiče typu n s volnými elektrony se záporným nábojem. Tato situace připomíná klasický kondenzátor s kladnou a zápornou kovovou elektrodou, které jsou od sebe vzájemně odděleny dielektrikem. Přechod pn se tedy v závěrném směru chová jako rovinný kondenzátor o kapacitě, kterou můžeme určit podle (9):

$$C_{bar} = S \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{w(U)} = S \left[\frac{e \epsilon_0 \epsilon_r}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{1}{V_{bi} - U} \right]^{1/2} \quad (9)$$

Symbol $w(U)$ označuje šířku ochuzené vrstvy pn přechodu, S je plocha daného přechodu, ϵ_0 a ϵ_r označují permitivitu vakua, respektive relativní permitivitu použitého

materiálu *pn* přechodu. Koncentrace příměsí jsou značeny N_D pro koncentraci donorů a N_A pro koncentraci akceptorů. Poslední neznámou ze vztahu (9) je V_{bi} označující kontaktní potenciál. Celý proces vzniku bariérové kapacity dokresluje obr. 17.



Obr. 17.: Vznik bariérové kapacity na pn přechodu (převzato z [5])

V obecném případě se kapacita definuje jako poměr malé změny náboje a malé změny přiloženého napětí podle vztahu (10):

$$C = \left| \frac{\Delta Q}{\Delta U} \right|, \quad \text{resp.} \quad C = \left| \frac{dQ}{dU} \right| \quad (10)$$

Tento vztah je zcela platný i pro bariérovou kapacitu. Při určitém závěrném napětí U na PN přechodu má ochuzená vrstva šířku x_n v oblasti n a x_p v oblasti p (viz. obr.17). V ochuzené vrstvě polovodiče typu n je prostorový náboj ionizovaných donorů a v polovodiči typu p stejně velký náboj ionizovaných akceptorů. Velikost tohoto náboje určuje vztah (11):

$$Q = eSN_D x_n = eSN_A x_p \quad (11)$$

Pokud se závěrné napětí na přechodu zvětší o ΔU , zvětší se také šířky ochuzených vrstev o Δx_n , resp. Δx_p . Obě tyto vrstvičky byly původně elektricky neutrální tzn., že náboj ionizovaných donorů byl kompenzován nábojem volných elektronů, resp. náboj ionizovaných akceptorů nábojem děr. Při zmiňovaném vzrůstu napětí z ochuzených

vrstev odtečou volné elektrony ke kontaktům a zvětší se nepohyblivý prostorový náboj ochuzené vrstvy tvořený ionizovanými donory a akceptory o:

$$\Delta Q = eSN_D \Delta x_n = eSN_A \Delta x_p \quad (12)$$

Při snížení závěrného napětí do ochuzených vrstev přitečou volné elektrony a díry z kontaktů, vykompenzují náboj ionizovaných donorů a akceptorů a náboj ochuzené vrstvy se zmenší. Tyto změny náboje způsobují vznik bariérové kapacity [5].

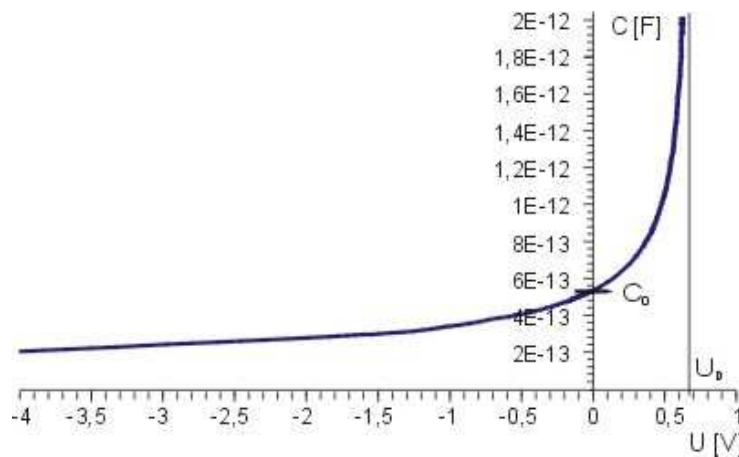
Poměr změny náboje a změny napětí je:

$$\lim_{\Delta U \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta Q}{\Delta U} \right| = \left| \frac{dQ}{dU} \right| = eSN_D \left| \frac{dx_n}{dU} \right| = eSN_A \left| \frac{dx_p}{dU} \right| = \left| \frac{e\epsilon_0\epsilon_r}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{1}{V_{bi} - U} \right|^{\frac{1}{2}} = C_{bar} \quad (13)$$

Porovnáním vztahů (13) a (9) vyplývá identita těchto výrazů, což dokazuje analogii *pn* přechodu s rovinným kondenzátorem.

Teplotní závislost bariérové kapacity není příliš významná a je dána především teplotní závislostí kontaktního potenciálu V_{bi} .

Daleko výraznější je již v úvodu této kapitoly zmiňovaná závislost bariérové kapacity na přiloženém napětí. Příklad takové závislosti ukazuje obr. 18.:

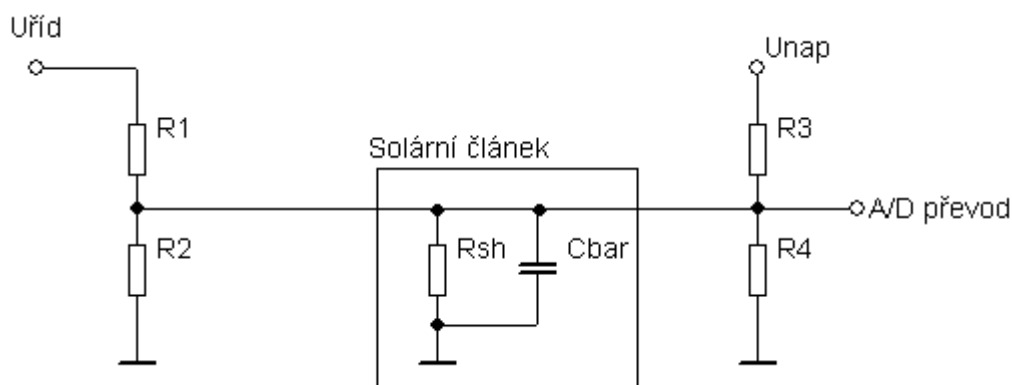


Obr. 18.: Příklad CV-charakteristiky polovodičového PN přechodu (převzato z [5])

8.2 Měření bariérové kapacity solárního článku

Obvod pro měření bariérové kapacity naznačuje obr.19. Princip činnosti spočívá v nabíjení a vybíjení vnitřní bariérové kapacity článku závěrným střídavým napětím. To je vytvořeno z řídicího napětí $U_{řid}$.

Řídicí napětí $U_{řid}$ má tvar obdélníku v rozmezí 0 – 5V. Pomocí rezistorů R1 a R2 je toto napětí upraveno na vhodnou velikost (kolem 50mV). Výsledkem této operace je tedy fakt, že na vstup solárního článku přichází malé střídavé napětí, které bariérovou kapacitu střídavě nabíjí a vybíjí.



Obr. 19.: Obvod pro měření bariérové kapacity solárních článků

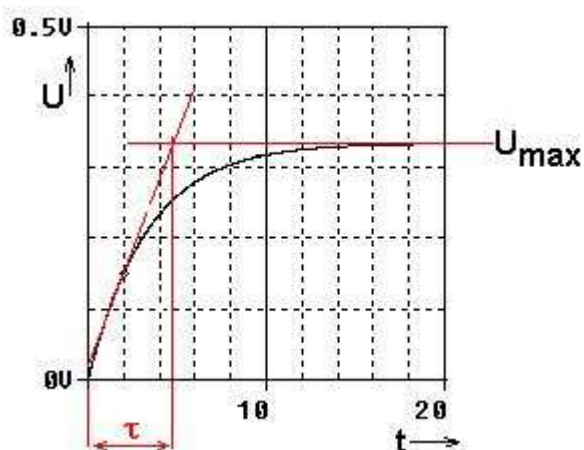
Střídavé napětí nabíjí bariérovou kapacitu solárního článku exponenciálním průběhem. Hodnota bariérové kapacity je dána ze vztahu (14):

$$C_{bar} = \frac{\tau}{R^*}, \quad (14)$$

V uvedeném vztahu představuje symbol τ časovou konstantu RC článku a R^* je paralelní kombinace odporů R2 a paralelního odporu solárního článku R_{sh} , nebo-li :

$$R^* = \frac{R2 * R_{sh}}{R2 + R_{sh}} \quad (15)$$

Celou situaci dokresluje obr. 20, na kterém je ukázán způsob zjištění časové konstanty τ měřeného RC článku.



Obr. 20.: Princip nabíjení bariérové kapacity

Kompletní návrh zařízení, které měří charakteristiky solárních článků, je popisován v následující kapitole.

9 Měření náhradního modelu solárního článku

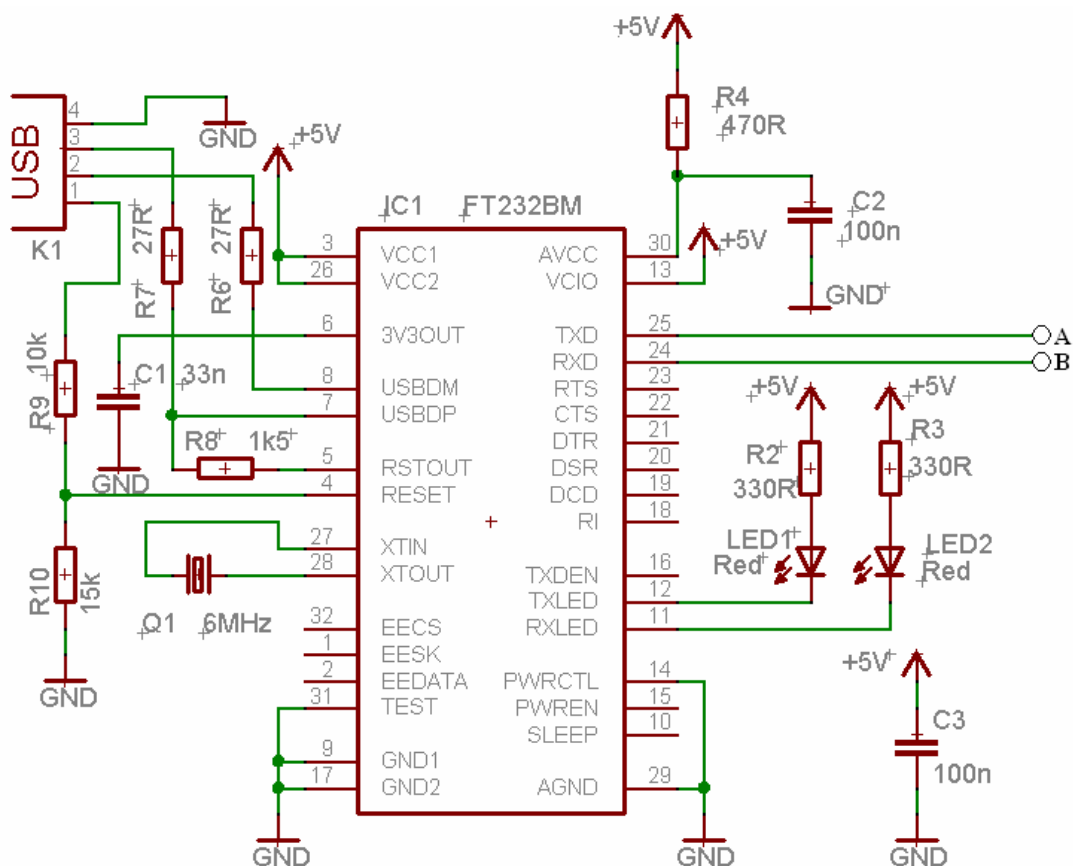
9.1 Návrh zařízení

V předcházejícím textu byly ukázány principy měření jednotlivých částí náhradního linearizovaného modelu solárních článků. Celkový návrh zařízení je možné rozdělit na tři základní části, které jsou zobrazeny na obr. 21 ,22 a 23.

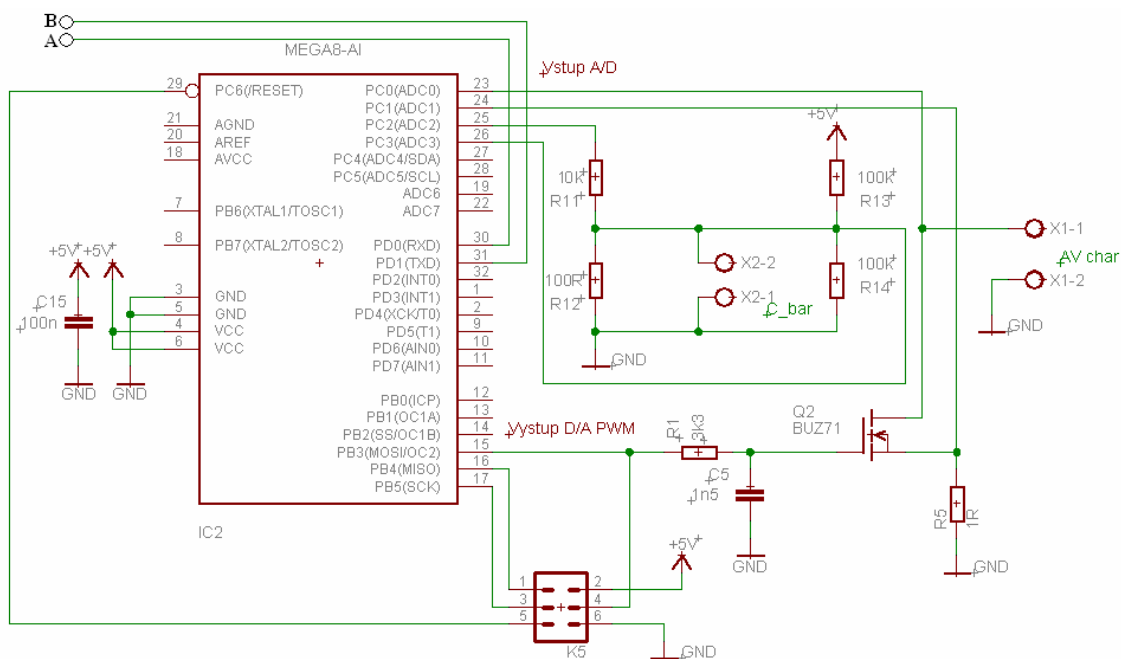
První část zařízení (viz. obr. 21) obsahuje převodník sériového portu na USB port. Tento převod zajišťuje obvod FT232BM (viz. kapitola 9.2 Popis jednotlivých bloků obvodu). Konkrétní zapojení této části obvodu je navrženo podle katalogového doporučení výrobce [10].

Druhá část navrhovaného zařízení (obr. 22) má za úkol vlastní proměření a vyhodnocení charakteristik solárních článků. Hlavním prvkem této části, a vůbec celého zařízení, je mikrokontroler ATMEL ATmega8. Jeho detailnímu popisu je věnována speciální kapitola této práce.

K mikrokontroleru jsou připojeny dvě měřicí aparatury, které byly popsány již dříve. První z nich měří AV charakteristiku solárního článku, druhá měří jeho bariérovou kapacitu.



Obr. 21.: Převodník sériové linky na USB port



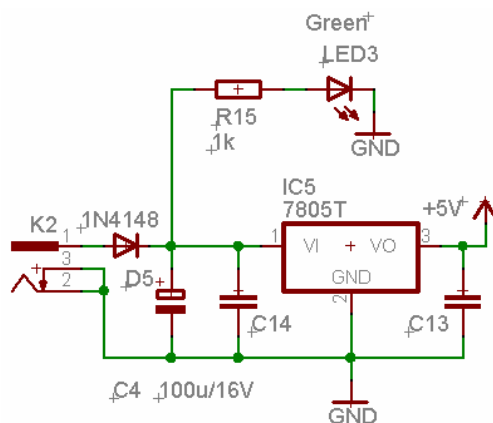
Obr. 22.: Měření charakteristik solárních článků

Měření AV charakteristik solárních článků je založeno na postupném zatěžování měřeného článku přes řídicí tranzistor odporovou zátěží (viz. kapitola 6.4). Napětím, které otevírá nebo zavírá řídicí tranzistor jsou v tomto případě obdélníkové pulsy šířkově modulovaného PWM signálu, které bylo vyfiltrováno na stejnosměrnou veličinu RC filtrem složeným z R1 a C5. Podle střidy signálu je na elektrodě gate řídicího tranzistoru Q2 napětí o různé velikosti a tím dochází k přivírání nebo otvírání tranzistoru a změně pracovních podmínek v této části obvodu. Pokud je na gate větší napětí, je tranzistor více otevřen a obvodem teče větší proud, napětí na solárním článku, který je připojen ke konektoru X1, tedy klesá. V opačném případě, kdy je na řídicí elektrodě tranzistoru malé napětí, je tranzistor téměř zavřen a proud, který teče obvodem má malou hodnotu – na solárním článku je téměř napětí na prázdnou (U_{OC}). Programovým řízením střidy PWM signálu je tedy dosaženo toho, že je ovládáno otvírání či zavírání tranzistoru Q2. to umožňuje proměření AV charakteristiky měřeného solárního článku. Napětí na solárním článku je snímáno a odesíláno na AD převodník přímo, proud obvodem je pak snímán jako úbytek napětí na zatěžovacím rezistoru R5.

Při měření bariérové kapacity článku je využívána druhá aparatura této části zapojení. Její detailní popis byl popsán v kapitole 8.2 Měření bariérové kapacity. Měřený solární článek je připojen ke konektoru X2. Při tomto měření je důležitý fakt, že článek je zatemněn, aby nedocházelo k ovlivňování měření osvětlením. Bariérová kapacita je, jak již bylo zmíněno, silně závislá na napětí, takže pokud je článek zatemněn, měla by tato závislost být eliminována, protože na měřeném článku bude 0V.

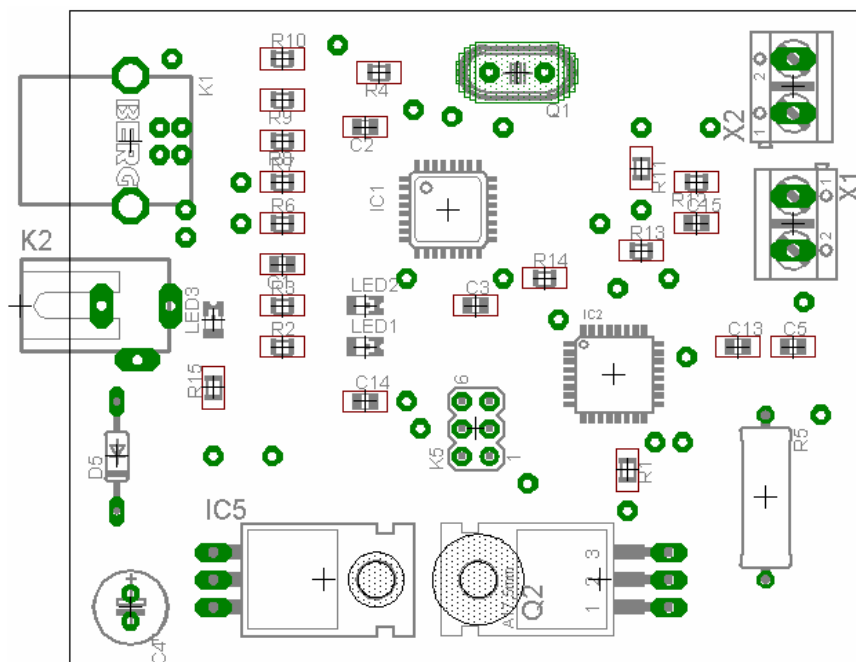
Naměřené hodnoty jsou předávány na AD převod a po převodu na digitální číslo jsou odeslány přes USB port na vyhodnocení řídicí aplikaci.

Třetí částí navrhovaného zařízení je napájecí obvod uvedený na obr. 23. V podstatě se jedná o katalogové zapojení stabilizátoru 7805T s přídatným připojením na adaptérový konektor.

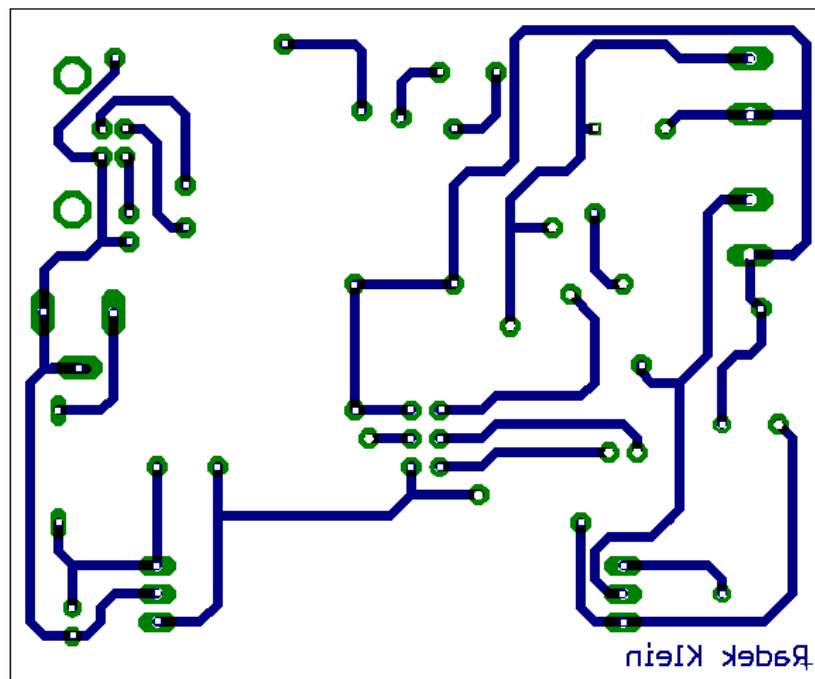


Obr. 23.: Napájecí obvod zařízení

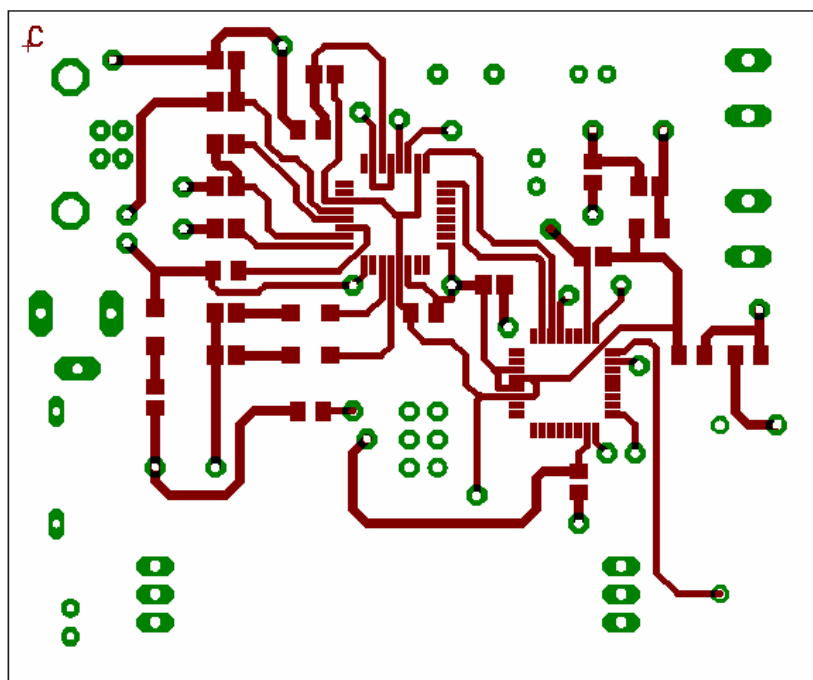
Celkový návrh DPS (desky plošného spoje) je na obr. 24 a naznačuje, jak jsou rozloženy na desce součástky. Návrh zařízení byl proveden v programu EAGLE 4.16. Další obrázky (obr. 26 a 27) ukazují rozložení spojů na straně vývodových součástek a na straně součástek pro povrchovou montáž.



Obr. 24.: Návrh DPS – rozložení součástek

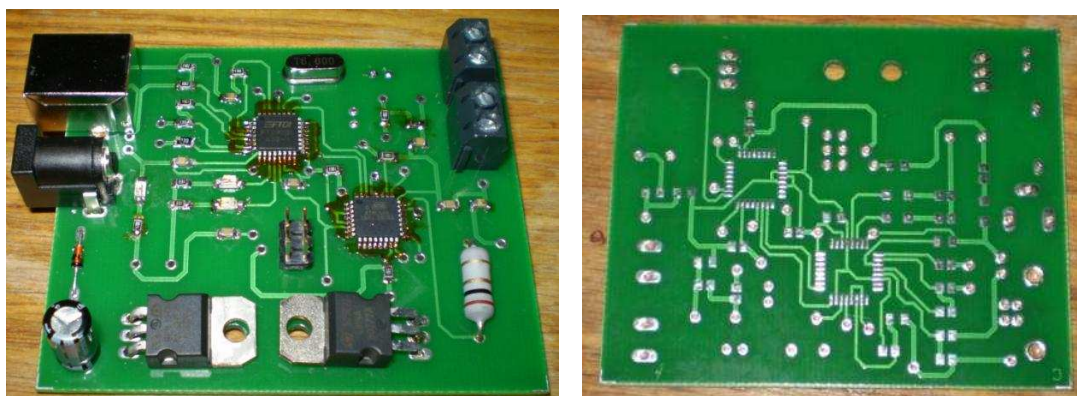


Obr. 25.: Návrh zařízení – rozložení spojů pro vývodové součástky



Obr. 26.: Návrh zařízení – rozložení spojů pro součástky pro povrchovou montáž

Při výrobě desky plošného spoje byla použita nepájivá maska, vývody, které měly být propojeny na obou stranách byly prokoveny. Celkové fotografie desky jsou na obr. 27, možné je vidět neosazenou DPS, ve druhé polovině obrázku je DPS osazená.



Obr. 27.: Fotografie navrhovaného zařízení

9.2 Popis jednotlivých bloků obvodu

V této kapitole budou stručně popsány dva čipy, které jsou použity v návrhu zařízení a to mikrokontroler ATMEL ATmega8 a převodník ze sériové linky na USB port FT232BM.

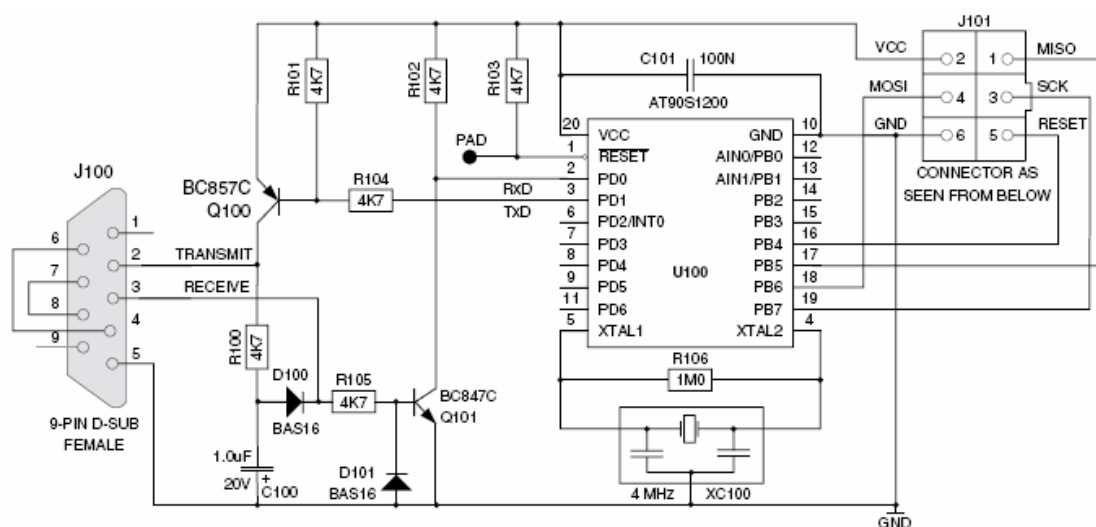
Mikrokontroler ATMEL ATmega8

Obvod ATMEL ATmega8 je nízkopříkonový 8-bitový mikrokontroler s pokročilou RISC architekturou [11]. Obsahuje tedy redukovaný instrukční soubor (130 instrukcí) a je schopen dosáhnout poměrně značného počtu výpočetních operací – dosahuje rychlosti 16 MIPS na 16 Mhz.

Obdobně jako ostatní mikrokontrolery firmy ATMEL je postaven na tzv. harvardské koncepci, tzn. že má paměť dat oddělenou od paměti programu. Paměť programu je tvořena 8 kB tzv. flash pamětí, která má možnost přeprogramování až 10 000x. Datová paměť je pak typu EEPROM a má velikost 512 B.

Mikrokontroler dále obsahuje celkem 23 I/O vývodů rozdělených do 3 portů (B,C,D), 8 A/D převodníků a 3 časovače. Jeho napájecí napětí se pohybuje v rozmezí 2,7 - 5,5 V.

Programování mikrokontroleru je možné povést pomocí 6-pinového konektoru (viz. konektor K5 na obr. 24). Mikrokontroler umožňuje díky tomuto konektoru využít metodu ISP (In System Programming), tedy přímé programování čipu v desce, aniž by z ní musel být vytažen. Samotné nahrání programu je pak provedeno pomocí speciálního programátoru – zapojení nabízeného firmou ATMEL [12]. Schéma tohoto programátoru ukazuje obr. 28.:



Obr. 28.: Zapojení ISP programátoru podle firmy ATMEL (převzato z [12])

Důležitou vlastností mikrokontroleru ATMEL ATmega8 je možnost řízení PWM. V rozebíraném zapojení je tento fakt použit při řízeném otevírání tranzistoru pro měření AV charakteristik.

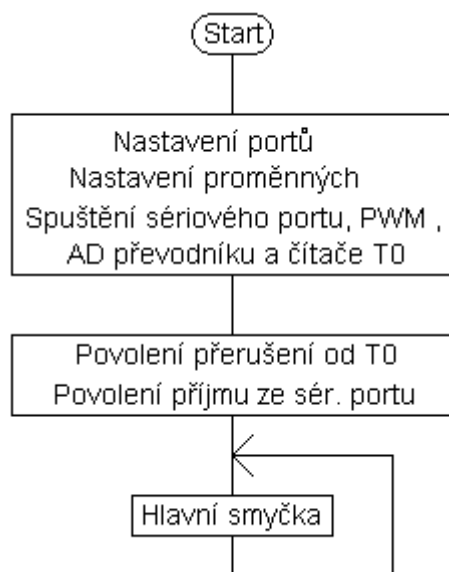
Převodník FT232BM

Obvod FT232BM slouží k převodu sériového portu na USB rozhraní. Rozhraní USB v osobních počítačích postupně vytlačilo zastaralý sériový port a umožnilo rychlejší komunikaci a automatickou detekci propojených zařízení.

Po nainstalování ovladačů, které jsou volně k dostání na internetu se připojený obvod FT232BM ukáže jako další sériový port, s tím rozdílem, že je připojen přes USB konektor.

9.3 Program mikrokontroleru

Program pro mikrokontroler byl vytvořen pomocí programovacího jazyka Assembler v prostředí AVR studio a v podstatě by se dal rozdělit celkem do čtyř hlavních bloků, které budou popsány v následující kapitole.

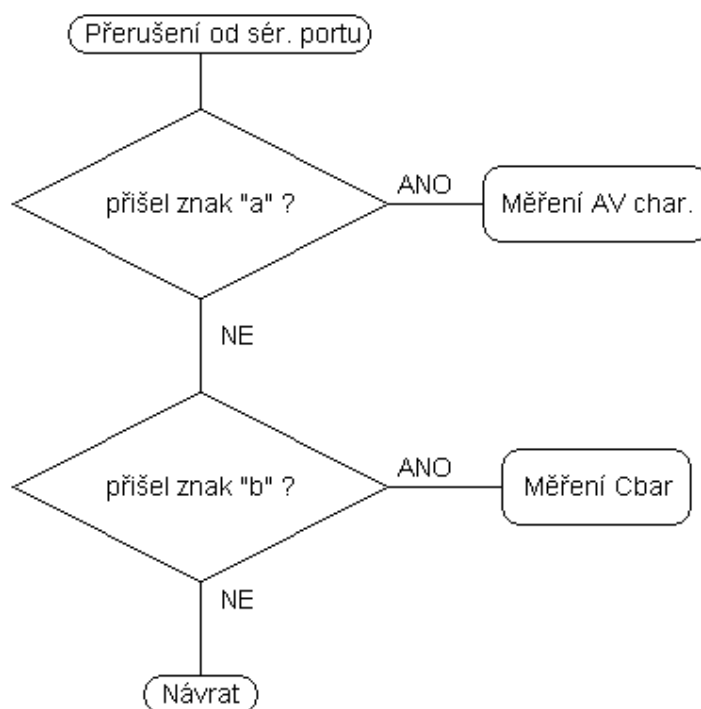


Obr. 29.: Blokové schéma hlavní smyčky programu

První část programu (viz. blokové schéma na obr. 29) nastavuje porty a proměnné. Dále pak spustí sériový port a také PWM mikrokontroleru, AD převodník a čítač T0.

Po nastavení a spuštění všech potřebných komponent je povoleno přerušení od T0 a také příjem ze sériové linky. Po té je spuštěna hlavní smyčka programu, která běží tak dlouho, dokud nedojde k přerušení.

K přerušení dojde, pokud řídící aplikace vyšle na sériovou linku znak a nebo b. Tyto znaky jsou pro aplikaci velice důležité, neboť oznamují mikrokontroleru, které měření má spustit. Pokud přijde po sériové lince do mikrokontroleru od aplikace znak **a**, přebírá řízení program pro měření AV charakteristiky solárního článku. Pokud přijde znak **b**, bude se měřit jeho bariérová kapacita. Celou situaci dokumentuje obr. 30, který zobrazuje blokové schéma rozhodovací části programu.



Obr. 30.: Blokové schéma rozhodovací části programu

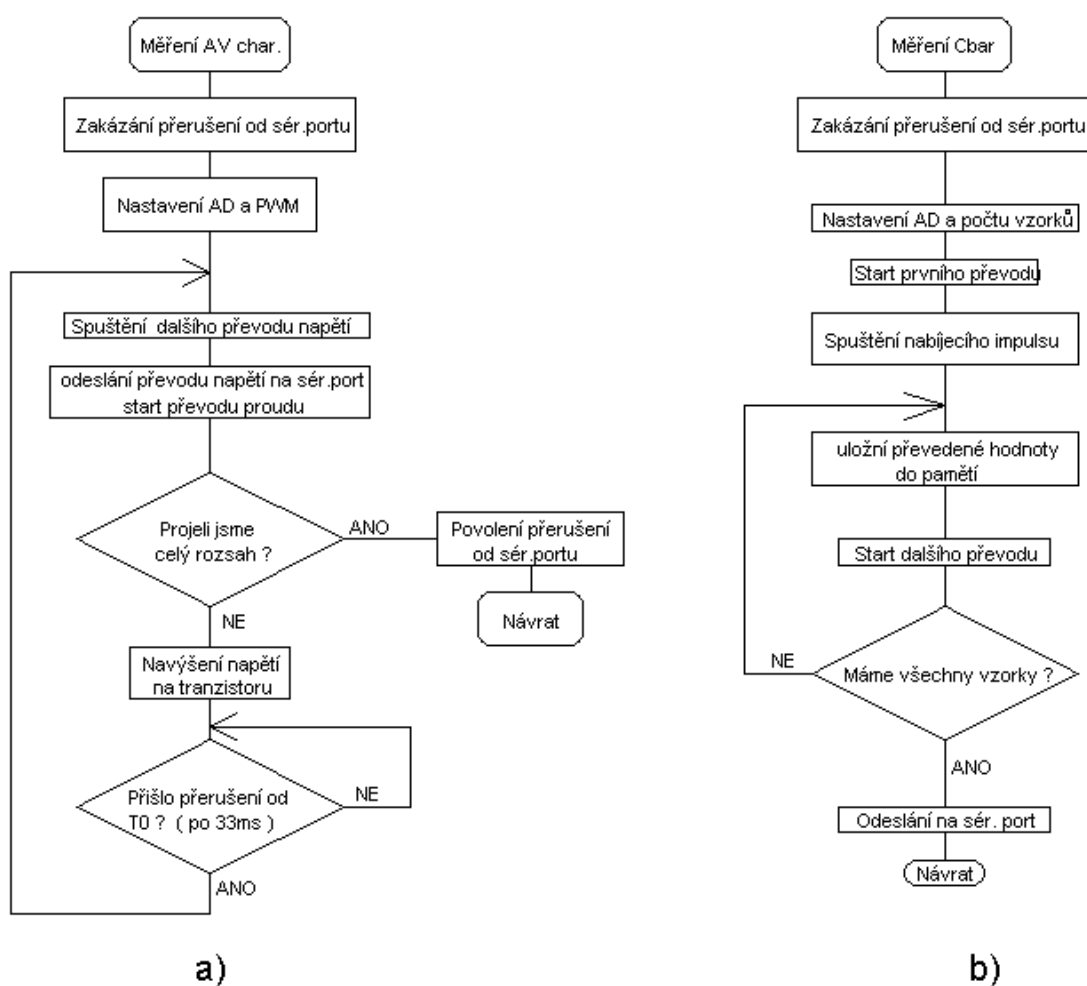
V případě, že po sériové lince přijde jiný znak, vyčkává program v hlavní smyčce opět na další přerušení.

Po vymaskování příchozího znaku po sériové lince je tedy jasné, kterou charakteristiku chce uživatel měřit a kontrolu nad programem převeze právě daná část.

Pokud tedy uživatel chce měřit AV charakteristiku solárního článku (poslal předtím po sériové lince díky řídící aplikaci znak **a**), postupuje program dále podle blokového schématu na obr. 31a).

Při měření AV charakteristiky je zapotřebí nejdříve zakázat přerušení od sériového portu, aby nebylo měření rušeno příchozími daty. Poté je nastaven AD převod a také výstup PWM, pomocí něhož je ovládán měřící tranzistor. Dojde ke spuštění převodu napětí odečteného ze solárního článku a jeho odeslání ve formě ASCII znaku na sériový port.

Následuje převod proudu, který je odečítán jako napětí na zatěžovacím rezistoru R5 a jeho opětovné odeslání na sériový port. Mezi hodnoty napětí a proudu na sériovém portu je vložen pro oddělení středník. Ve výsledku tak tedy během měření pro jednu hodnotu napětí putuje na sériový port ASCII znak napětí (2 číslice – data jsou posílána v hexadecimálním tvaru, proto 2 číslice), za ním oddělovací středník a po něm další 2 číslice reprezentující ASCII znak proudu.



Obr. 31.: Měření charakteristik solárních článků

- a) AV charakteristika
- b) bariérová kapacita

Program se přesune o řádek níž pomocí odřádkování a nyní rozhoduje zda již projel všechny hodnoty napětí ze svého rozsahu. Pokud je tento dotaz vyhodnocen kladně (program již proměřil celý pracovní rozsah, který je 0 - 2,56 V), je povoleno přerušení od sériové linky a program se vrací do hlavní smyčky. Pokud je dotaz vyhodnocen záporně, zvýší se napětí na řídícím tranzistoru (změnou hodnoty na PWM výstupu mikrokontroleru) a program dospěje do dalšího rozhodovacího místa. Je totiž zapotřebí,

aby po navýšení napětí na řídicím tranzistoru došlo k ustálení této hodnoty. Program tedy čeká, dokud tomu tak není a poté zahájí další měření.

Celé měření AV charakteristiky končí tehdy, kdy je na PWM výstupu mikrokontroleru maximální napětí a tranzistorem Q2 teče maximální proud. Maximální podmínky jsou dány referenčním napětím, které je v tomto případě nastaveno na 2,56V.

Pokud chce uživatel měřit bariérovou kapacitu solárního článku, postupuje program podle obr. 31b). Prvním krokem je, stejně jako u předchozího měření, po příchodu znaku **b** ze sériového portu zakázání přerušení. Dále se nastaví AD převodníky a také počet měřených vzorků. Počet vzorků v případě navrhovaného zařízení byl stanoven na 16.

Po nastavení AD převodníků a počtu měřených vzorků je zahájen první převod napětí. Do zapojení, které již bylo zveřejněno výše (viz. obr. 19) je vyslán jednotkový skok, který nabíjí bariérovou kapacitu. Průběh napětí na článku je navzorkován a uložen do paměti.

V tomto případě musel být použit mezikrok uložení naměřených dat do paměti, protože při převodu docházelo k ovlivňování dvou sousedních hodnot a obvod tak neměřil hodnoty zcela správně. Důvodem toho byl totiž fakt, že přenosová rychlost sériového portu je nižší, než frekvence vzorkování.

Pokud jsou hodnoty uloženy v paměti, je nastartován další převod napětí. Po té je rozhodnuto, zda již program proměřil všech 16 vzorků či nikoliv. V případě že ne, opět naměřené hodnoty uloží do paměti a pokračuje v dalším převodu navzorkovaných hodnot. Pokud program má uložen v paměti již dostatečný počet hodnot, pošle je všechny na sériový port a řízení v té chvíli opět převezme řídicí aplikace. Program mikrokontroleru se opět vrátí do hlavní smyčky a vyčkává na další přerušení.

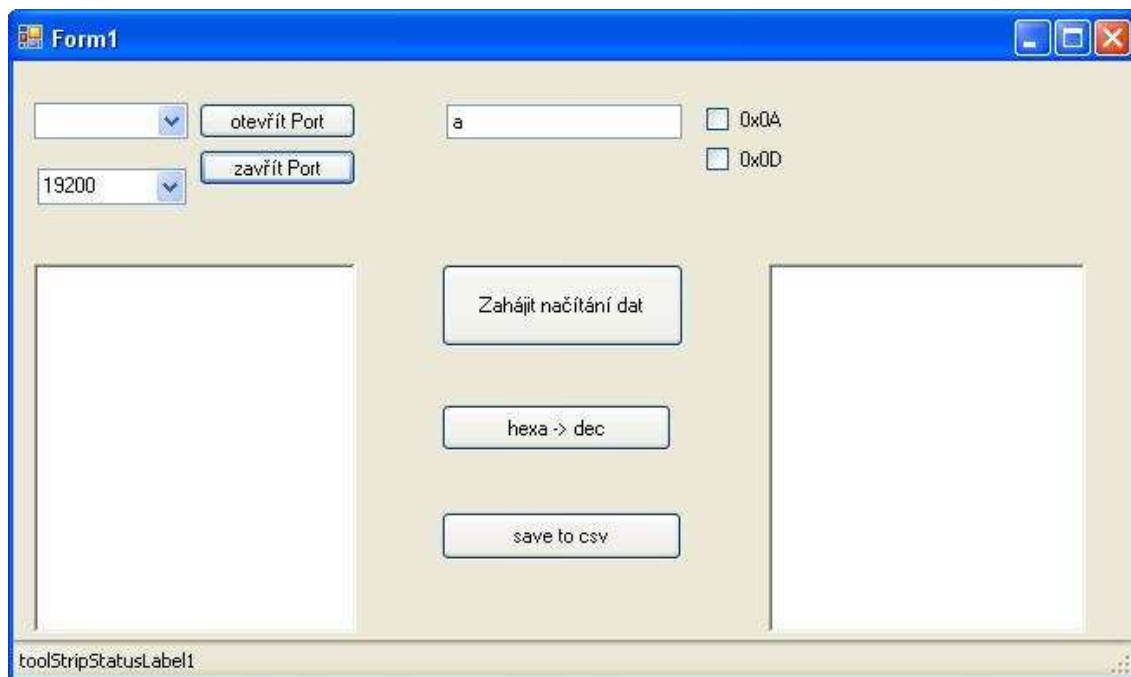
Při měření bariérové kapacity je jako referenční napětí použito, stejně jako u předchozího typu měření, hodnoty 2,56V a časová vzdálenost mezi dvěma vzorky je 52μs. Na sériový port je po ukončení měření odeslána každá hodnota naměřeného napětí ve dvou ASCII znacích a za každou hodnotu následuje oddělovací středník, dále pak dvě nulové hodnoty a odřádkování.

Kompletní program zařízení je uveden na konci této práce v příloze A a obsahuje navíc i podrobnější komentář ke každému kroku programu.

9.4 Řídící aplikace měření

Celé měření je řízeno aplikací, která byla naprogramována ve vývojovém prostředí Microsoft Visual C# 2005, které umožňuje programovat pomocí jazyka C# aplikace Windows Forms, tedy aplikační okna, která umožňují provádět nejrůznější operace.

Vzhled aplikačního okna řídicího programu je na obr. 32.



Obr. 32.: Řídící program zařízení

V levé části aplikačního okna si uživatel může před zahájením vlastního měření zvolit port, ze kterého chce načítat data, tento port otevřít a odesláním patřičného znaku z prostředního labelu zahájit stiskem tlačítka načítání dat. Před zahájením dat je ještě možnost nastavit rychlost přenosu dat – roletka pod výběrem portu.

Po stisku tlačítka *Zahájit načítání dat* se do levého okna začnou vypisovat měřená data. Jejich obsah bude záležet na tom, co uživatel v dané chvíli měří, budou však v hexadecimálním tvaru. Převod do dekadické soustavy je vyřešen po stisku patřičného tlačítka a zároveň s tímto stiskem se dekadická data vypíše do pravého okna formuláře. Po této operaci je možné naměřená data uložit do formátu csv a dále je pak zpracovávat v programu Microsoft Excel do grafické podoby.

Program začíná inicializací (funkce *Init*), kdy je sestaven a zobrazen formulář programu a jsou načteny všechny dostupné COM porty. Dále se ve funkci *Init* nastaví výchozí komunikační rychlost na 19200 baudů. Tím funkce *Init* končí.

Pokud dojde ke stisku tlačítka *Otevřít port*, obslužný program tohoto tlačítka vyhodnotí, jestli je port již otevřen nebo není. Pokud je otevřen, vypíše program informaci, že tomu tak je. V opačném případě dojde k nastavení rychlosti komunikace, čísla portu a jiných vlastností přenosu a port se otevře. Opět je toto otevření indikováno hlášením v levém dolním rohu aplikace. Pokud se při otevření portu vyskytne chyba, vypíše program informační okno, že daný port nemůže otevřít.

Stejným způsobem jako otevírání portu je ošetřeno i jejich zavírání. Po stisku tlačítka *Zavřít port* program vyhodnotí, jestli je port otevřený či nikoliv. Pokud dosud uzavřen nebyl, provede se jeho uzavření a stav zavřeno je indikován informačním návěstím. Pokud dojde k chybě při uzavírání portu, je to opět oznámeno chybovým hlášením.

Před samotným měřením je nutné, aby uživatel zadal do komponenty *text_v_okne_nad* písmeno **a** nebo **b** (podle druhu měření, které hodná provádět). Pokud chce uživatel zahájit načítání dat, stiskne tlačítko *Zahájit načítání dat*. V té chvíli se obsah komponenty *text_v_okne_nad* zapíše na sériovou linku a je načten mikroprocesorem, který vyhodnotí, jaký druh měření má spustit. V úvahu připadají pouze dva znaky, které se zapisují na sériovou linku a to : **a** pro případ měření AV charakteristik solárních článků a **b** pro měření bariérové kapacity článku.

Po dekodování znaku poslaného na sériovou linku přebírá řízení od aplikace mikrokontroler, který po proběhnutí jeho programu začne po sériové lince posílat zpět aplikaci naměřená data. V té chvíli se opět řízení předává aplikaci. V jejím programu je zakotveno, že pokud se na sériové lince objeví zpět posílaná data, uloží tyto data do textboxu s názvem *treceivedinfo* (textbox v levé části aplikačního okna).

Příchozí data jsou v hexadecimální soustavě, převod z hexadecimální soustavy do soustavy dekadické proběhne stiskem tlačítka *hexa->dec*. Převedená data se automaticky vypíší do textboxu *convertedtext* (umístěného tentokrát v pravé části aplikačního okna).

Ukládání naměřených dat probíhá následujícím způsobem. Po stisku tlačítka *save to csv* program vyfiltruje požadovaný dialog pro uložení do formátu csv a po pojmenování souboru uživatelem (po vyplnění formuláře *Nazev_souboru*) se do daného souboru uloží obsah komponenty *convertedtext* (okno s převedenými daty v pravé části formuláře).

S uloženými daty si pak uživatel v programu Microsoft Excel může libovolně operovat a vyhodnotit tak charakteristiky měřeného solárního článku podle toho, jak sám potřebuje.

Kompletní program ovládací aplikace je uveřejněn jako příloha B na konci této práce.

10 Praktické měření a vyhodnocení

Při měření zkušebních vzorků byly použity dva typy solárních článků, oba dva jsou ukázány na obr. 33.:



Obr. 33.: Typy solárních článků použité při zkušebních měřeních

Typ I je solární článěk firmy GES Electronics ze sady s označením SSC24-04, která podle katalogových údajů výrobce má při plném slunečním osvětlení mít napětí naprázdno $U_{OC} = 0,57 \text{ V}$ a proud $I_{SC} = 700 \text{ mA}$.

Typ II je vyřazený solární článěk, který se již nepoužívá z důvodů svých špatných charakteristik.

Měřením byly zjištěny hodnoty napětí U_{OC} při osvětlení žárovkou 40W, výsledky ukazuje tab.2.:

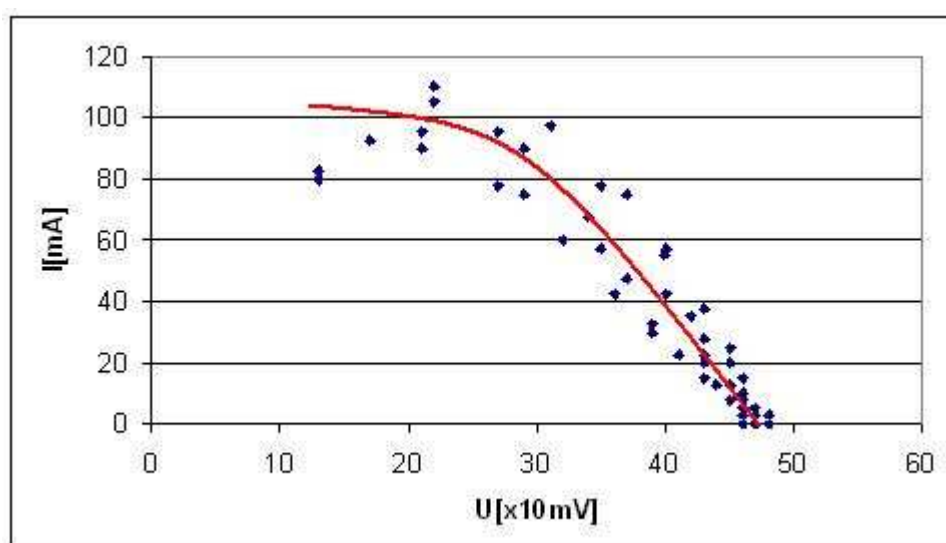
Tab.2.: Naměřené hodnoty napětí U_{OC}

Typ článku	$U_{OC}[\text{V}]$
Typ I	0,48
Typ II	0,43

Porovnáním hodnot napětí naprázdno vychází zcela jasně najevo, že velikost solárního článku je rozhodujícím faktorem při měření této veličiny. U typu I je naměřená hodnota velmi blízká hodnotě uváděné v katalogu a nepatrný rozdíl lze vysvětlit tím, že při měření nebyly dodrženy podmínky při osvětlení článků.

10.1 Měření AV charakteristik

Navrhnutým zařízením bylo provedeno měření AV charakteristik měřených solárních článků. Nejdříve byl měřen typ I. Jeho výsledná AV charakteristika je na obr.34.:



Obr. 34.: AV charakteristika solárního článku typu I

Během měření došlo, zřejmě vlivem chyby aparatury a také vlivem nesprávného osvětlení, k chybě měření, proto musely být naměřené charakteristiky upravovány a naměřená charakteristika proložena.

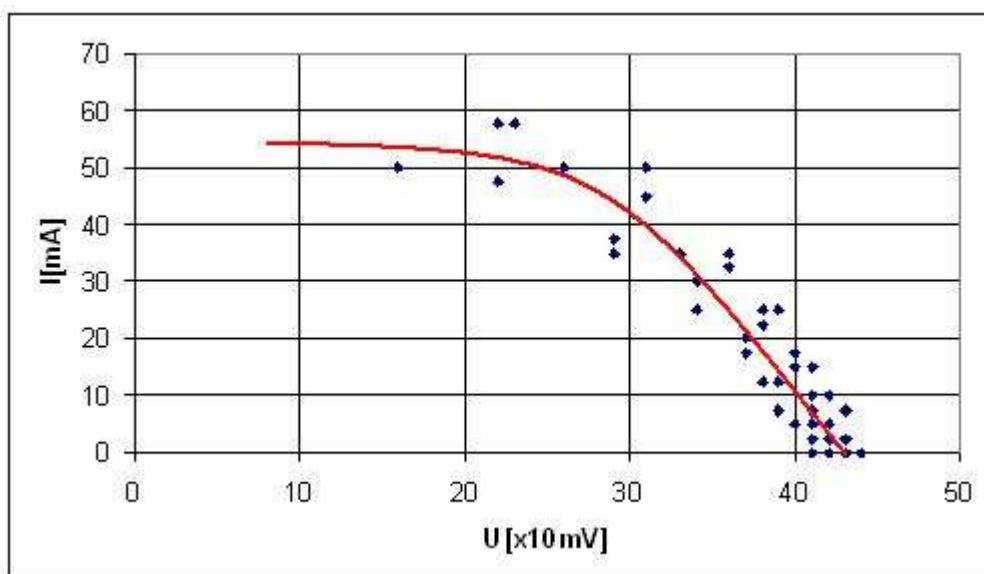
Z obr.34 vyplývá, že typ I měl v době měření napětí naprázdno U_{OC} rovné 0,48 V a zkratový proud měl hodnotu $I_{SC}=100$ mA. Použitím naměřených hodnot je možné tedy určit podle vztahů (3) a (4) hodnoty paralelního, resp. sériového odporu tohoto článku. Paralelní odpor článku je roven:

$$R_{sh} = \frac{U_1 - U_{SC}}{I_{SC} - I_1} = \frac{0,29 - 0}{0,1 - 0,09} = 29\Omega \quad (16)$$

Hodnota sériového odporu je pak rovna :

$$R_{so} = \frac{U_{OC} - U_2}{I_2 - I_{OC}} = \frac{0,48 - 0,43}{15 \cdot 10^{-3} - 0} = 3,33\Omega \quad (17)$$

Stejným způsobem bylo provedeno i měření pro typ II. Už vzhledem k naznačené poznámce vlivu velikosti článků na jejich charakteristiky se daly očekávat rozdílné výsledky.



Obr. 35.: AV charakteristika solárního článku typu II

Graf AV charakteristiky solárního článku typu II ukazuje obr. 35. Z něj je patrné, že článek typu II má zhruba poloviční hodnoty I_{SC} a menší napětí naprázdno, konkrétně

$I_{SC}=55 \text{ mA}$ a $U_{OC} = 0,41 \text{ V}$. Opět i u tohoto článku byl proveden z naměřených hodnot výpočet hodnot paralelního a sériového odporu, viz. vztahy (18) a (19):

Paralelní odpor :

$$R_{sh} = \frac{U_1 - U_{SC}}{I_{SC} - I_1} = \frac{0,31 - 0}{0,055 - 0,045} = 31 \Omega \quad (18)$$

Sériový odpor :

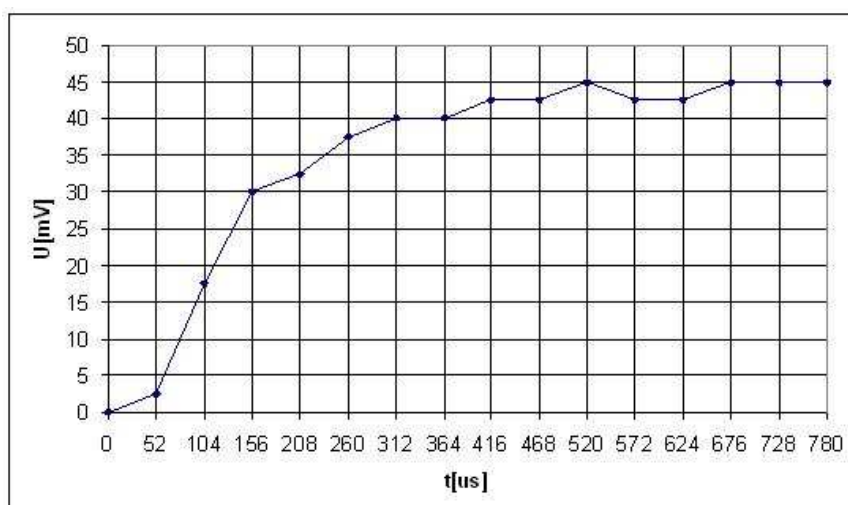
$$R_{so} = \frac{U_{oc} - U_2}{I_2 - I_{oc}} = \frac{0,48 - 0,43}{15 \cdot 10^{-3} - 0} = 3,33 \Omega \quad (19)$$

Srovnáním hodnot paralelních a sériových odporů solárních článků vychází skutečnost, že hodnoty u typu I a typu II jsou dosti podobné. Celkové srovnání hodnot je ukázáno v Tab. 3. uvedené v kapitole 10.3 Shrnutí výsledků měření.

10.2 Měření bariérových kapacit

Po přepojení solárního článku ke konektoru X2 byla měřena bariérová kapacita obou typů solárních článků.

Nabíjení bariérové kapacity u typu I ukazuje obr. 36, z tohoto grafu je velmi dobře možné odečíst časovou konstantu vytvořeného RC článku (ten je tvořen bariérovou kapacitou článku C_{bar} , dále pak paralelním odporem článku R_{sh} a rezistorem R12)



Obr. 36.: Měření bariérové kapacity solárního článku typu I

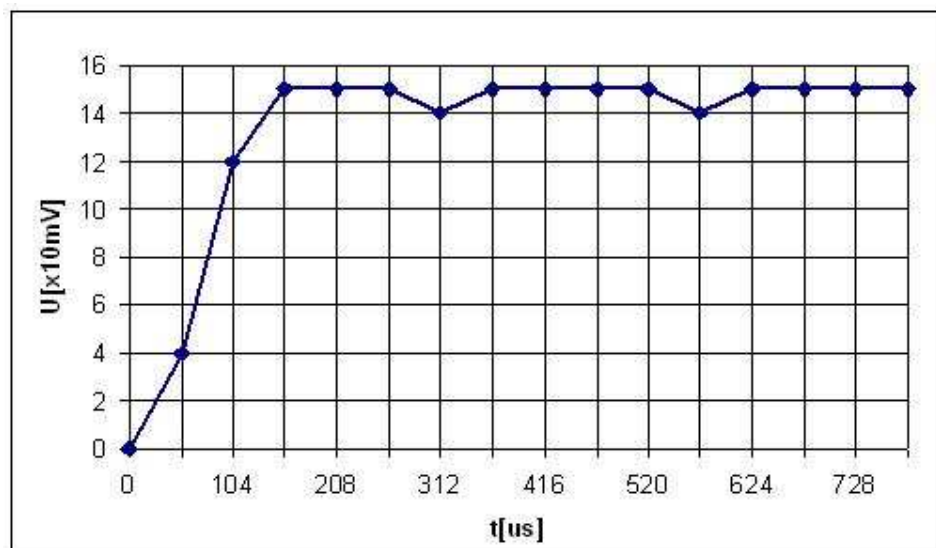
Velikost odečtené konstanty τ je $208\mu s$, z této hodnoty a ze znalosti paralelního odporu článku lze vyjádřit bariérová kapacita :

$$C_{bar} = \frac{\tau}{R^*} = \frac{208 * 10^{-6}}{22,48} = 9,25\mu F , \quad (20)$$

kde R^* se vypočítá jako :

$$R^* = \frac{R_2 * R_{sh}}{R_2 + R_{sh}} = \frac{100 * 29}{100 + 29} = 22,48\Omega \quad (21)$$

Stejné měření bylo provedeno i pro solární článek typu II. Výsledky ukazuje obr.37 a pod ním jsou uvedené výpočty bariérové kapacity. Časová konstanta τ byla rovna zhruba $104\mu s$.



Obr. 37.: Měření bariérové kapacity solárního článku typu II

Bariérová kapacita článku typu II:

$$C_{bar} = \frac{\tau}{R^*} = \frac{104 * 10^{-6}}{23,66} = 4,39\mu F , \quad (22)$$

kde R^* se vypočítá opět jako :

$$R^* = \frac{R_2 * R_{sh}}{R_2 + R_{sh}} = \frac{100 * 31}{100 + 31} = 23,66\Omega \quad (23)$$

10.3 Shrnutí výsledků měření

V tab.3 jsou uvedeny všechny naměřené a vypočtené hodnoty u obou typů solárních článků.

Tab.3.: Shrnutí naměřených výsledků

	$U_{oc}[V]$	$I_{sc}[mA]$	$R_{sh}[\Omega]$	$R_{so}[\Omega]$	$C_{bar}[\mu F]$
Typ I	0,48	100	29	2,67	9,25
Typ II	0,41	55	31	3,33	4,39

Srovnáním hodnot obou článků se zjistí, že článek typu I má větší napětí naprázdno a zkratový proud (vzhledem k větším rozměrům oproti typu II), má však menší hodnoty paralelního i sériového odporu. Hodnota bariérové kapacity je pak zhruba 2x větší než druhý zkoumaný článek. Tento fakt je v celku logický, typ II má menší rozměry, tudíž použitím analogie s rovinným kondenzátorem musí být jasné, že bude mít menší bariérovou kapacitu.

11 Závěr

Navrhnuté zařízení je schopné proměřit AV charakteristiku solárního článku a odezvu článku na jednotkový skok, naměřená data z ní jsou řídicí aplikací ukládána do datových souborů pro pozdější zpracování uživatelem.

Z naměřených dat je možné odečíst prvky náhradního modelu solárního článku – a to paralelní odpor, sériový odpor a bariérovou kapacitu článku.

Pomocí zařízení byly proměřeny dva typy solárních článků, byly u nich stanoveny prvky náhradního modelu a proměřena AV charakteristika.

Měření AV charakteristik je zatíženo chybou, která zřejmě vzniká v důsledku nedodržení předepsaných podmínek měření a také vlastní chybou aparatury.

Použitá literatura

- [1] BAŘINKA, R. Energie slunce – výroba elektřiny [cit. 2006-10-5]. Dostupné z WWW:
http://www.ekowatt.cz/library/infolisty/infolisty1999/slunce_elektrina.php3
- [2] Fotoelektrický jev [cit. 2006-10-5]. Dostupné z WWW :
http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaiický_jev
- [3] JÍCHA, Z. Solární panely [cit. 2006-10-5]. Dostupné z WWW:
<http://suman-elektro.kvalitne.cz/panely.htm>
- [4] KAZELLE, J. *Výrobní procesy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006. 167 stran.
- [5] HORÁK, M. *Mikroelektronické prvky a struktury*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2006 116 stran.
- [6] Jak měříme solární články [cit. 2008-05-01]. Dostupné z WWW:
<http://www.solartec.cz/cs/projekty/zajimavosti/mereni-clanku.html>
- [7] Nejekologičtější zdroj nevyčerpatelné energie [cit. 2008-05-01]. Dostupné z WWW: <http://www.solartec.cz/cs/projekty/zajimavosti/nejekologictejsi-zdroj-energie.html>
- [8] Studium solárního článku [cit. 2007-8-9]. Dostupné z WWW:
http://www.kfy.zcu.cz/prakt/Prakt_II/UF140/6/solar23.pdf
- [9] BRZOBOHATÝ, J. *Elektronické součástky*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2002. 205 stran.
- [10] FT232BM datasheet [cit. 2007-8-9]. Dostupné z WWW:
http://www.ftdichip.com/Documents/DataSheets/DS_FT232BM.pdf
- [11] ATMEL ATmega8 datasheet [cit. 2007-8-9]. Dostupné z WWW :
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/2486s.pdf

- [12] AVR910: In-System Programming [cit. 2007-8-9]. Dostupné z WWW:
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc0943.pdf

Příloha A : Program mikrokontroleru ATMEL ATmega8

```
;ATmega8 @8MHz
;program meri zatezovou char. osviceneho
;nebo barierovou kapacitu zatemnneho fotovoltaiickeho clanku
;a hodnoty posila na seriovy port rychlosti 19200 baud
;
;Mereni AV char.:
;referencni napeti je 2,56V. Napeti VA char. je mereno
;s rozlisenim 10 mV, proud ma rozliseni 2,5 mA,
;na vstupu PC0 je pripojen osviceny fotovoltaiicky clanek
;vystup PWM na PB3 ovlada zatezovaci tranzistor,
;mezi tranzistorem a zemi je proudovy snimaci rezistor 1 Ohm,
;napeti je z neho snimano PC1
;na seriovy port je odeslan ASCII tvar napeti (2 cislice),
;nasleduje strednik, dalsi 2 ASCII znaky snimaneho proudu
;a nakonec odradkovani pomoci $0A.

;Mereni Cbar:
;Referencni napeti je 2,56V. Rozliseni napeti je 2,5 mV
;Na PC2 je poslan skok z 0 na 5 V, PC3 snima napeti
;na nabijejici se Cbar. Casova vzdalenost mezi 2 vzorky
;je 52 us. Hodnota napeti je prevedena vzdy do dvou
;ASCII znaku a po namereni 16 vzorku jsou hodnoty
;hromadne odeslany pres seriovy port. Za kazdou hodnotou
;nasleduje strednik, 2 nuly a odradkovani $0A.
;

.INCLUDE "m8def.inc"           ;definice registru

.DEF TMP=R12
.DEF CIS16=R13                 ;registr scitaci konstanty
.DEF PISM=R14                  ;ASCII offset 'A' od '9'
.DEF NUM=R15                   ;ASCII hodnota nuly
.DEF REG=R16                   ;docasny registr
.DEF CNT=R17
.DEF STAV=R18                  ;registr stavu programu
.DEF CNT2=R19                  ;citac pro mereni Cbar

.EQU PREVOD=$40                ;priznak prvnioho prevodu VA

.ORG    $0000
RJMP    START                  ;skok na zacatek programu
.ORG    OVf0addr               ;preteceni citace 0
RJMP    T0_int
.ORG    URXCaddr               ;seriovy port: RX Complete
RJMP    RX_int
.ORG    ADCCaddr               ;dokonceni AD prevodu
AD:     CPI    CNT2,16          ;pokud mame hotovy prvni prevod
        BRNE   AD1
        SBI    PORTC,2         ;spustime impulz nabijejici Cbar
AD1:    IN     REG,ADCL         ;nacteni prevedene hodnoty
        MOV    TMP,REG         ;docasne ulozeni
        IN     REG,ADCH         ;dokoncime cteni z AD
        SBI    ADCSRA,ADSC     ;start dalsiho A/D prevodu
        ;prevedeme na ASCII a ulozone do pameti
        MOV    REG,TMP         ;nacteme ulozenou hodnotu
        SWAP   REG             ;prohodime nibbles
        ANDI   REG,$0F         ;ponechame dolni 4 bity
        ADD    REG,NUM         ;ziskani ASCII cisla
```



```

        CPI      REG,$3A
        BRLO     AD2
        ADD      REG,PISM
AD2:    ST        Y+,REG          ;ulozeni do pameti prvni cast
cisla

        MOV      REG,TMP          ;nacteni puvodni hodnoty z AD
        ANDI     REG,$0F          ;ponechame dolni 4 bity
        ADD      REG,NUM          ;ziskani ASCII cisla
        CPI      REG,$3A
        BRLO     AD3
        ADD      REG,PISM
AD3:    ST        Y+,REG          ;ulozime druhou cast cisla

        DEC      CNT2
        BREQ     PosliCb          ;pokud jsme zmerili vsechny vzorky
        RETI

PosliCb:;tady odesleme vzorky z pameti na USART
        CBI      ADCSRA,ADIE      ;zakazeme preruseni od dokonceneho
prevodu
        CBI      PORTC,2          ;konec impulzu nabijeni Cbar
        LDI      CNT2,16          ;budeme merit 16x
        LDI      YL,$60          ;nastavime ukazatel na zacatek
pameti
DalsiCb:LD      REG,Y+
        OUT      UDR,REG          ;odesleme prvni cast hodnoty na
USART

        LDI      CNT,255          ;pockame na odeslani 2x255 us
        RCALL    CEK
        LDI      CNT,255
        RCALL    CEK

        LD       REG,Y+
        OUT      UDR,REG          ;odesleme druhou cast hodnoty na
USART

        LDI      CNT,255          ;pockame na odeslani 2x255 us
        RCALL    CEK
        LDI      CNT,255
        RCALL    CEK

        LDI      REG,';'
        OUT      UDR,REG          ;odesleme strednik za prvni
hodnotou

        LDI      CNT,255          ;pockame na odeslani 2x255 us
        RCALL    CEK
        LDI      CNT,255
        RCALL    CEK

        LDI      REG,'0'
        OUT      UDR,REG          ;odesleme prvni cast hodnoty na
USART

        LDI      CNT,255          ;pockame na odeslani 2x255 us
        RCALL    CEK
        LDI      CNT,255
        RCALL    CEK

        LDI      REG,'0'

```

```

        OUT        UDR,REG                ;odesleme druhou cast hodnoty na
USART
        LDI        CNT,255                ;pockame na odeslani 2x255 us
        RCALL      CEK
        LDI        CNT,255
        RCALL      CEK

        LDI        REG,$0A                ;odesleme novy radek za druhou
hodnotou
        OUT        UDR,REG

        LDI        CNT,255                ;pockame na odeslani 2x255 us
        RCALL      CEK
        LDI        CNT,255
        RCALL      CEK

        DEC        CNT2
        BRNE       DalsiCb                ;odesilame 16 hodnot
KonecCb:RETI

MerCB:  LDI        CNT,$C3                ;nastav Vref = 2,56V, vstup PC3,
right adjust
        OUT        ADMUX,CNT              ;.. merime napeti na clanku
        LDI        REG,$CD                ;Zapnuti ADC, start prevodu, ..
        OUT        ADCSRA,REG             ;.. preddelicka 32 (250kHz@8Mhz
Xtal)
        LDI        CNT2,16                ;budeme merit 16x
        LDI        YL,$60                ;nastavime ukazatel na zacatek
pameti
        LDI        REG,1<<TXEN|1<<RXEN ;povoleni TX, RX bez preruseni z
RX
        OUT        UCSRB,REG
        RETI

;Preruseni pri prijeti znaku ze serioveho portu
RX_int: IN         REG,UDR                ;nacteni prijateho znaku do REG
        CPI        REG,$61                ;pokud prisel znak 'a', spusti se
mereni VA char
        BREQ       MerVA
        CPI        REG,$62                ;pokud prisel znak 'b', spusti se
mereni Cbar
        BREQ       MerCB
        RETI

;Zacatek mereni
MerVA:  SBR        STAV,PREVOD             ;nastavime priznak prevodu
        LDI        REG,1<<TXEN|1<<RXEN ;povoleni TX, RX bez preruseni z
RX
        OUT        UCSRB,REG
        LDI        REG,$3F
        OUT        OCR2,REG               ;nastaveni pocatecni hodnoty PWM
        LDI        REG,$86               ;Zapnuti ADC, preddelicka 64
(125kHz@8Mhz Xtal)
        OUT        ADCSRA,REG

;Preruseni pri pretecení T0
;prevedeme napeti, odesleme, prevedeme proud, odesleme, zvyseni PWM
T0_int: SBRS       STAV,6                 ;konec pokud nebezi prevod
        RETI

```

```

        LDI        CNT,$E0                ;nastav Vref = 2,56V, vstup PC0,
left adjust
        OUT        ADMUX,CNT
        SBI        ADCSRA,ADSC            ;start prvnioho A/D prevodu na PC0
        ;prevod trva 104 us
        LDI        CNT,120                ;pockame 120 us
        RCALL      CEK

        IN         REG,ADCH                ;nacteni prevedene hodnoty z PC0
        LDI        CNT,$C1                ;nastav Vref = 2,56V, vstup PA1,
right adjust
        OUT        ADMUX,CNT                ;vezmeme pouze 8 dolnich bitu
10bitoveho prevodu
        SBI        ADCSRA,ADSC            ;start dalsiho A/D prevodu na PC1
        RCALL      Pis1                    ;zapiseme hodnotu na USART
        LDI        REG,','                ;odesleme strednik za prvni
hodnotou
        OUT        UDR,REG
        LDI        CNT,255                ;pockame na odeslani 2x255 us
        RCALL      CEK
        LDI        CNT,255
        RCALL      CEK

        ;uplynulo asi 3x40 us, prevod trva 110 us. Muzeme cist ADCL
        IN         REG,ADCL                ;nacteni prevedene hodnoty z PA6
        RCALL      Pis1                    ;zapiseme hodnotu na displej a
USART
        IN         REG,ADCH                ;dokoncime cteni z AD
        LDI        REG,$0A                ;odesleme novy radek za druhou
hodnotou
        OUT        UDR,REG

        IN         REG,OCR2                ;zjistime aktualni stav PWM
        CPI        REG,$FF                ;pokud jsme projeli cely rozsah,
koncime
        BREQ       T0int1
        INC        REG                    ;zvysime hodnotu PWM
        INC        REG                    ;zvysime hodnotu PWM
        OUT        OCR2,REG
        RETI

T0int1: LDI        REG,$3F
        OUT        OCR2,REG                ;nastavime vychozi hodnotu PWM
        LDI        REG,1<<TXEN|1<<RXEN|1<<RXCIE;povoleni TX, RX a
preruseni z RX
        OUT        UCSRB,REG
        CBR        STAV,PREVOD            ;smazeme priznak prevodu
        RETI

Pis1:   MOV        TMP,REG                ;docasne ulozeni
        SWAP       REG                    ;prohodime nibbles
        ANDI       REG,$0F                ;ponechame dolni 4 bity
        ADD        REG,NUM                ;ziskani ASCII cisla
        CPI        REG,$3A
        BRLO       Pis2
        ADD        REG,PISM

Pis2:   OUT        UDR,REG                ;vyslani na seriovy port
        ;odeslani trva 420us @19,2 kBd
        LDI        CNT,255                ;pockame na odeslani 2x255 us
        RCALL      CEK
        LDI        CNT,255
        RCALL      CEK

```

```

        MOV     REG,TMP                ;nacteni puvodni hodnoty z AD
        ANDI    REG,$0F                ;ponechame dolni 4 bity
        ADD     REG,NUM                ;ziskani ASCII cisla
        CPI     REG,$3A
        BRLO    Pis3
        ADD     REG,PISM
Pis3:    OUT     UDR,REG                ;vyslani na seriovy port
        LDI     CNT,255                ;pockame na odeslani 2x255 us
        RCALL   CEK
        LDI     CNT,255
        RCALL   CEK
;odeslani trva 420us @19,2 kBd
        RET

;*** Zacatek programu ***
START:   LDI     REG,high(RAMEND)
        OUT     SPH,REG
        LDI     REG,low(RAMEND)
        OUT     SPL,REG                ;nastaveni SP
        LDI     REG,$F4                ;PC2 je vystup na mereni Cbar
        OUT     DDRC,REG
        LDI     REG,$FF
        OUT     PORTB,REG
        OUT     PORTD,REG
        LDI     REG,$30                ;ASCII offset cisla 0
        MOV     NUM,REG
        LDI     REG,$07                ;ASCII offset
        MOV     PISM,REG
        LDI     REG,$10                ;scitaci konstanta PWM
        MOV     CIS16,REG
        LDI     YH,$00
        LDI     YL,$60
        RCALL   TRXINI                ;spusteni USART
        RCALL   PWMINI                ;spusteni PWM
        RCALL   ADCINI                ;nastaveni A/D prevodniku

;nastaveni T0
T0init:  LDI     REG,5
        OUT     TCCR0,REG              ;nastaveni preddelicky 1024
        (pretecení za 33 ms)
        LDI     REG,1<<TOIE0
        OUT     TIMSK,REG              ;povolení preruseni od T0
        SEI
        CLR     STAV                  ;povolení všech preruseni

;***hlavni smycka***
Loop:    RJMP    Loop                  ;smycka

;nastaveni USART
TRXINI:  LDI     REG,$19
        OUT     UBRRL,REG              ;baud rate 19200, U2X=0, UBRR=25
        LDI     REG,1<<TXEN|1<<RXEN|1<<RXCIE;povolení TX, RX a
preruseni z RX
        OUT     UCSRB,REG
        RET

;nastaveni prevodniku:
ADCINI:  LDI     REG,$E0                ;nastav Vref = 2,56V, vstup PC0,
        left adjust

```

```

        OUT        ADMUX,REG
        LDI        REG,$86
(125kHz@8Mhz Xtal)
        OUT        ADCSRA,REG
        RET

;inicializace PWM modulu
PWMINI: IN         REG,DDRB
        ORI        REG,$08
zachovame
        OUT        DDRB,REG
        LDI        REG,$3F
        OUT        OCR2,REG
        LDI        REG,$69
        OUT        TCCR2,REG
        RET

;ceka CNT*1 us (@ 8 MHz):
CEK:    DEC        CNT
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        BRNE       CEK
        RET

;ceka 40 us:
CEK40:  LDI        CNT,40
        RCALL      CEK
        RET

;ceka 1600 us:
CEK160: LDI        CNT,255
        RCALL      CEK
        LDI        CNT,255
        RCALL      CEK
        LDI        CNT,255
        RCALL      CEK
        LDI        CNT,255
        RCALL      CEK
        LDI        CNT,255
        RCALL      CEK
        LDI        CNT,255
        RCALL      CEK
        LDI        CNT,64
        RCALL      CEK
        RET

;Zapnuti ADC, preddelicka 64

;nacteme puvodni hodnoty
;PB3 je vystup (PWM), ostatni

;pocatecni hodnota vystupu

;nastaveni funkce PWM, no prescale

```

Příloha B : Program ovládací aplikace

Comport.cs

```
using System;
using System.Windows.Forms;
using System.Net;
using System.Net.Sockets;
using System.Data;
using System.IO;
using System.IO.Ports;
using System.Configuration;
using System.Collections;
using System.ComponentModel;
using System.Reflection;

namespace KleinRadek
{
    public partial class Form1
    {
        // -- send command to COM port

        public void WriteCOMCommand(string command)
        {
            string CR = System.Convert.ToString(System.Convert.ToChar(0x0D));
            string LF = System.Convert.ToString(System.Convert.ToChar(0x0A));
            try
            {
                comport.Write(command);
                if (chkCR.Checked)
                {
                    comport.Write(CR);
                }
                if (chkLF.Checked)
                {
                    comport.Write(LF);
                }
                //textComPortTx.Text = "";
            }
            catch
            {
                MessageBox.Show("port není pravděpodobně otevřen");
            }
        }

        private void portOpen()
        {
            try
            {
                if (comport.IsOpen)
                {
                    //log(logtype.Error, String.Format("Port is open\n"));
                    MessageBox.Show("Port již otevřen");
                }
            }
            else
            {
                comport.BaudRate = Convert.ToUInt16(comspeed.Text);
                comport.DataBits = 8;
                comport.StopBits = StopBits.One;
                comport.Parity = Parity.None;
            }
        }
    }
}
```

```

        comport.WriteBufferSize = 2;
        comport.WriteTimeout = 100;
        comport.PortName = comPorts.Text;

        comport.Open();
        comstatus.Text = "Otevřen port " + comport.PortName;
        //log(logtype.Info, String.Format("Port opened\n"));
        //MessageBox.Show("Port otevřen");
    }
}
catch
{
    //log(logtype.Error, String.Format("Port error\n"));
    MessageBox.Show("nemohu otevřít port " + comport.PortName);
}
}

//-- uzavrení portu -----
private void portClose()
{
    try
    {
        if (comport.IsOpen)
        {
            comport.Close();
            comstatus.Text = "Port zavřen";
            //log(logtype.Info, String.Format("Port closed\n"));
        }
        else
        {
            //log(logtype.Error, String.Format("Port isn't open\n"));
        }
    }
    catch
    {
        //log(logtype.Error, String.Format("Port error\n"));
    }
}
}
}

```

Hlavní pogram

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
using System.IO.Ports;

namespace KleinRadek
{
    public partial class Form1 : Form

```

```

{
    public Form1()
    {
        InitializeComponent();
        foreach (string s in SerialPort.GetPortNames())
        {
            comPorts.Items.Add(s);
        }
        comspeed.Text = Convert.ToString(19200);
        System.Windows.Forms.Control.CheckForIllegalCrossThreadCalls = false;
    }

    private void bOpenPort_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        portOpen();
    }

    private void bclosePort_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        portClose();
    }

    private void comport_DataReceived(object sender, SerialDataReceivedEventArgs e)
    {
        treceivedinfo.Text += comport.ReadExisting();
    }

    private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        WriteCOMCommand(textBox1.Text);
    }

    private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        int x=0;
        int lines = treceivedinfo.Lines.Length;
        //MessageBox.Show(Convert.ToString(treceivedinfo.Lines.Length));
        string LF = System.Convert.ToString(System.Convert.ToChar(0x0A));
        while (x < lines)
        {
            if (treceivedinfo.Lines[x].Length > 4)
            {
                convertedtext.Text +=
Convert.ToString(Convert.ToUInt16(treceivedinfo.Lines[x].Substring(0, 2), 16)) + ";" +
Convert.ToString(Convert.ToUInt16(treceivedinfo.Lines[x].Substring(3, 2), 16)) + LF;
            }
            x++;
        }
    }

    private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        //MessageBox.Show(Convert.ToString(Convert.ToUInt16("4E",16)));
        MessageBox.Show(Convert.ToString(treceivedinfo.Lines[5].Length));
    }

    private void button4_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        saveFileDialog1.Filter = "csv files (*.csv)|*.csv|All files (*.*)|*.*";
    }
}

```



```

saveFileDialog1.FilterIndex = 1;

saveFileDialog1.ShowDialog();
string soubor = saveFileDialog1.FileName;
MessageBox.Show(soubor);
convertedtext.SaveFile(soubor, RichTextBoxStreamType.PlainText);
//treceivedinfo.SaveFile(soubor, RichTextBoxStreamType.PlainText
}

private void saveFileDialog1_FileOk(object sender, CancelEventArgs e)
{
}
}
}

```